

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Vjekoslav Salopek**

Zagreb, 2011.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Janoš Kodvanj

Student:

Vjekoslav Salopek

Zagreb, 2011.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno, koristeći stečena znanja tijekom studija, navedenu literaturu i opremu Laboratorija za eksperimentalnu mehaniku.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Janošu Kodvanju na podršci, dobrim smjernicama i korisnim savjetima tijekom izrade ovog rada. Zahvaljujem se prof. dr. sc. Borisu Ljubenkovu i asistentu dipl. ing. Nikoli Vladimiru na savjetima i pomoći u izradi rada kao i na ustupljenoj literaturi.

Zahvaljujem se dr. sc. Anti Bakiću na pomoći tokom cjelokupne izrade ovog rada, korisnim savjetima prilikom pripreme i provedbe ispitivanja te analize istih.

Zahvaljujem se i asistentu dipl. ing. Zvonimiru Tomičeviću na pomoći pri izradi programskog koda za opterećivanje ispitnih uzoraka.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima, obitelji, djevojci i prijateljima na razumijevanju i potpori tijekom cjelokupnog studija

Vjekoslav Salopek



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne  
simulacije

|  |        |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum  | Prilog |
| Klasa:   |        |
| Ur.broj:   |        |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

Mat. br.:

Naslov:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Mladen Andrassy

Referada za diplomske i završne ispite

Obrazac DS - 3A/PDS - 3A

## SADRŽAJ

|  |      |
|--|------|
| SADRŽAJ .....  | I    |
| POPIS TABLICA .....  | V    |
| POPIS OZNAKA .....   | VI   |
| SAŽETAK .....  | VIII |
| 1. UVOD .....  | 1    |
| 1.1. Hipoteza rada.....                                    | 4    |
| 1.2. Povijesni pregled proučavanja zamora materijala ..... | 4    |
| 2. BRODSKE KONSTRUKCIJE .....                              | 6    |
| 2.1. Projektiranje brodskih konstrukcija .....             | 6    |
| 2.2. Entiteti čvrstoće brodskih konstrukcija .....         | 7    |
| 2.3. Zamor materijala brodskih konstrukcija .....          | 8    |
| 2.3.1. Oštećenja u zavarenim spojevima.....                | 10   |
| 2.3.2. Oblikovanje konstrukcijskih detalja .....           | 14   |
| 2.3.3. Zaostala naprezanja.....                            | 15   |
| 2.3.4. Upotreba čelika visoke čvrstoće .....               | 16   |
| 2.3.5. Korozija .....                                      | 17   |
| 2.4. Kritični detalji brodskih konstrukcija .....          | 18   |
| 2.4.1. Tankeri .....                                       | 20   |
| 2.4.1.1. Podjela tankera po vrsti tereta koji prevoze..... | 21   |
| 2.4.1.2. Podjela tankera po veličini.....                  | 21   |
| 3. ZAMOR MATERIJALA .....                                  | 23   |
| 3.1. Pukotine.....   | 23   |
| 3.1.1. Iniciranje pukotine .....                           | 24   |
| 3.1.2. Propagacija pukotine do kritične veličine .....     | 28   |
| 3.1.3. Lom preostalog dijela poprečnog presjeka.....       | 31   |
| 3.2. Krhki lom .....                                       | 32   |
| 3.2.1. Krhki lom stakla.....                               | 33   |
| 3.3. Irwinova modificirana teorija loma .....              | 34   |
| 4. ISPITIVANJE MAHANIČKIH SVOSTAVA MATERIJALA .....        | 36   |
| 4.1. Dinamička izdržljivost .....                          | 38   |
| 4.2. Wöhlerova krivulja .....                              | 41   |
| 4.3. Smithov dijagram.....                                 | 44   |
| 4.4. Cikličko opterećenje promjenjive amplitude .....      | 49   |
| 5. GENERIRANJE SPEKTRA OPTEREĆENJA.....                    | 51   |
| 5.1. Statički vlačni pokus .....                           | 58   |
| 5.1.1. Epruvete za ispitivanje .....                       | 63   |
| 5.1.2. Provedba statičkog vlačnog pokusa .....             | 66   |
| 5.1.3. Rezultati statičkog vlačnog pokusa.....             | 68   |
| 6. PROVEDBA DINAMIČKIH ISPITIVANJA .....                   | 70   |

|   |    |
|---|----|
| 6.1. Određivanje amplitude naprezanja u spektru opterećenja .....       | 70 |
| 6.1.1. Određivanje osnovne amplitude ciklusa naprezanja .....           | 71 |
| 6.1.2. Definiranje parametara spektra opterećenja .....                 | 73 |
| 7. REZULTATI DINAMIČKIH ISPITIVANJA .....                               | 76 |
| 7.1. Rezultati za osnovni spektar .....                                 | 76 |
| 7.2. Rezultati za spektar I .....                                       | 78 |
| 7.3. Rezultati za spektar II .....                                      | 78 |
| 7.4. Usporedba rezultata .....  | 79 |
| 7.4.1. Statički vlačni pokus u svrhu analize očvrsnuća materijala ..... | 81 |
| 8. ZAKLJUČAK .....  | 84 |
| 9. PRILOZI .....  | 86 |
| 10. LITERATURA .....  | 87 |

## POPIS SLIKA

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Slika 1.  | Područja najvećih tankerskih nezgoda [3] .....   | 1  |
| Slika 2.  | Lom jednog od brodova tipa Liberty i inicijalna pukotina koja je uzrokovala krhki lom trupa broda [4] .....                  | 2  |
| Slika 3.  | Entiteti teorije čvrstoće u brodskim konstrukcijama [8] .....  | 8  |
| Slika 4.  | Različite vrste oštećenja zavaru [11] .....  | 10 |
| Slika 5.  | Mikroskopske pogreške u zavaru kao izvor zarezanog djelovanja .....  | 11 |
| Slika 6.  | Primjeri nepodudaranja; a) linearno kod križnog spoja, b) kutno kod sučeonog spoja, c) linearno kod sučeonog spoja [2] ..... | 11 |
| Slika 7.  | Utjecaj koncentracije naprezanja na dinamičku čvrstoću [9] .....   | 14 |
| Slika 8.  | Shematski prikaz uzroka pojave zaostalih naprezanja [1] .....  | 15 |
| Slika 9.  | Raspodjela zaostalih naprezanja u zavarenom spoju [2] .....  | 16 |
| Slika 10. | Utjecaj materijala na dinamičku izdržljivost [10] .....  | 16 |
| Slika 11. | Uobičajena mjesta zamora brodske konstrukcije - spojevi i vezne strukture [8] ..   | 18 |
| Slika 12. | Kritično mjesto pojave zamornog oštećenja - dvodno tankera [5] .....   | 19 |
| Slika 13. | Zamorno oštećenje uzdužnjaka tankera - bok broda [5] .....   | 19 |
| Slika 14. | Pregled veličina tankera .....   | 22 |
| Slika 15. | Shematski prikaz nastanka zamornog sloma [1] .....   | 23 |
| Slika 16. | Gibanje rubne dislokacije [20] .....   | 25 |
| Slika 17. | Mikroskopski izgled dislokacija .....  | 25 |
| Slika 18. | Razvoj pojasa klizanja [14] .....  | 26 |
| Slika 19. | Stvaranje intruzija i ekstruzija na slobodnoj površini .....   | 27 |
| Slika 20. | Tvrda uključina kao izvor ispod površinskog začeca pukotine Cr-Mo čelika .....   | 27 |
| Slika 21. | Tri primjera trostrukog začeca mikropukotina na jednom izvoru kod Cr-Mo čelika [20] .....                                    | 28 |
| Slika 22. | Faze rasta pukotine pri cikličkom opterećenju [4] .....  | 29 |
| Slika 23. | Produljenje pukotine u jednom ciklusu opterećenja [4] .....  | 30 |
| Slika 24. | Brazde stvorene kod zamornog loma .....  | 30 |
| Slika 25. | Shematski prikaz procesa napredovanja zamornih pukotina [22] .....   | 31 |
| Slika 26. | Površina loma uslijed zamora materijala .....  | 32 |
| Slika 27. | Irvinov model pukotine [24] .....  | 34 |
| Slika 28. | Načini otvaranja pukotine pri lomu [4] .....   | 35 |
| Slika 29. | Sistematizacija mehaničkih ispitivanja .....   | 37 |
| Slika 30. | Vrste dinamičkih opterećenja, a) stohastičko, b) periodičko, c) harmonično [26] ..   | 38 |
| Slika 31. | Uz definiciju osnovnih pojmova [27] .....  | 39 |
| Slika 32. | Istosmjerno promjenjivo naprezanje s prednaprežanjem [10] .....  | 40 |
| Slika 33. | Čisto istosmjerno promjenjivo naprezanje [10] .....  | 40 |
| Slika 34. | Naizmjenično promjenjivo naprezanje s prednaprežanjem [10] .....   | 41 |
| Slika 35. | Čisto naizmjenično promjenjivo naprezanje [10] .....   | 41 |
| Slika 36. | Wöhlerovi dijagrami: a) linearno mjerilo, b) logaritamsko mjerilo .....  | 42 |
| Slika 37. | S-N krivulje kod promjene omjera naprezanja [11] .....   | 43 |
| Slika 38. | Polje rasipanja kod Wöhlerove krivulje .....   | 44 |
| Slika 39. | Smithov dijagram trajne dinamičke čvrstoće [26] .....  | 45 |
| Slika 40. | Načini aproksimacije linije trajne dinamičke čvrstoće .....  | 46 |



|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Slika 41. | Smithov dijagram trajne dinamičke čvrstoće: a) za različite vrste opterećenja, b) Smithov dijagram za poznate tri karakteristike čvrstoće $R_{-1}$ , $R_0$ , $R_e$ ..... | 47 |
| Slika 42. | Osnovni principi Smithovog dijagrama [26] .....  | 48 |
| Slika 43. | Razdioba naprezanja podijeljena u blokove konstantnog naprezanja [2] .....   | 49 |
| Slika 44. | Linearna akumulacija zamora Palmgren – Miner) [28] .....   | 50 |
| Slika 45. | Analogija njihanja broda i djelovanja elektronskog filtera [29] .....  | 51 |
| Slika 46. | Atlas mora podijeljen na zone [30] .....   | 52 |
| Slika 47. | Spektar valnih visina .....  | 54 |
| Slika 48. | I Spektar opterećenja .....  | 56 |
| Slika 49. | II Spektar opterećenja.....  | 57 |
| Slika 50. | Tijek statičkog vlačnog pokusa.....  | 58 |
| Slika 51. | Dijagram sila - produljenje za konstrukcijski čelik.....   | 59 |
| Slika 52. | Dijagram naprezanje – istežanje [32].....  | 61 |
| Slika 53. | Dijagram naprezanje - istežanje za neke metalne materijale [32] .....  | 62 |
| Slika 54. | Karakteristične veličine okrugle epruvete [33].....  | 64 |
| Slika 55. | Epruvete korištene za provedbu eksperimenta .....  | 65 |
| Slika 56. | Statička kidalica Messphysik Beta 50-5.....  | 66 |
| Slika 57. | Markeri postavljeni na epruvetu .....  | 67 |
| Slika 58. | Programsko sučelje: Videoextensometar NG.....  | 67 |
| Slika 59. | Dijagram naprezanje - istežanje .....  | 68 |
| Slika 60. | Epruvete nakon ispitivanja .....   | 69 |
| Slika 61. | Stvarni dijagram naprezanje - istežanje.....   | 69 |
| Slika 62. | Servohidraulička umaralica LFV 50-HH s upravljačkom jedinicom.....   | 70 |
| Slika 63. | Prikaz epruvete u čeljusti umaralice zajedno sa upravljačkim sučeljem.....   | 71 |
| Slika 64. | Površina loma uslijed zamora epruvete E_6.....   | 72 |
| Slika 65. | Epruveta opterećena velikom tlačnom silom.....   | 75 |
| Slika 66. | Osnovno opterećenje: maksimalan pomak - broj ciklusa.....  | 77 |
| Slika 67. | Usporedba broja ciklusa do loma .....  | 79 |
| Slika 68. | Usporedni dijagram: maksimalni pomak - broj ciklusa .....  | 80 |
| Slika 69. | Početni ciklusi kod opterećivanja Spektrom II .....  | 81 |
| Slika 70. | Naprezanje - istežanje.....  | 82 |

## POPIS TABLICA

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1. Kategorije detalja zavarenih spojeva.....                               | 12 |
| Tablica 2. Teorijska čvrstoća .....  | 24 |
| Tablica 3. Podaci o stanju mora u sjevernom Atlantiku (područje 8, 9, 15, 16)..... | 53 |
| Tablica 4. Suma pojavljivanja određenih valova .....                               | 54 |
| Tablica 5. Parametri za I spektar .....  | 56 |
| Tablica 6. Parametri za II spektar .....   | 57 |
| Tablica 7. Modul elastičnosti za neke materijale [31].....                         | 60 |
| Tablica 8. Preporučene dimenzije epruveta prema Registru.....                      | 64 |
| Tablica 9. Dimenzije za izradu epruveta.....                                       | 64 |
| Tablica 10. Promjeri i površine poprečnih presjeka epruveta.....                   | 65 |
| Tablica 11. Rezultati ispitivanja statičkog vlačnog pokusa .....                   | 68 |
| Tablica 12. Parametri za određivanje osnovne amplitude .....                       | 72 |
| Tablica 13. Vrijednosti osnovne amplitude opterećenja.....                         | 73 |
| Tablica 14. Parametri za Spektar I .....   | 73 |
| Tablica 15. Parametri za Spektar II.....   | 74 |
| Tablica 16. Rezultati ispitivanja za osnovni spektar .....                         | 76 |
| Tablica 17. Rezultati ispitivanja za Spektar I.....                                | 78 |
| Tablica 18 . Rezultati ispitivanja za Spektar II .....                             | 78 |
| Tablica 19. Prosječan broj ciklusa do loma .....                                   | 79 |
| Tablica 20. Podaci opterećivanja karakterističnih epruveta .....                   | 81 |
| Tablica 21. Rezultati statičkog vlačnog pokusa .....                               | 82 |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka    | Jedinica             | Opis  |
|-----------|----------------------|---|
| $a$       | [mm]                 | duljina pukotine  |
| $A$       | [%]                  | istezljivost materijala   |
| $C$       |                      | konstanta materijala  |
| $D$       |                      | akumulacija oštećenja   |
| $d$       | [mm]                 | konačan promjer epruvete  |
| $D_i$     |                      | zamorno oštećenje kod $N_i$ ciklusa                                       |
| $E$       | [N/mm <sup>2</sup> ] | modul elastičnosti  |
| $f$       |                      | frekvencija   |
| $F_e$     | [N/mm <sup>2</sup> ] | sila tečenja  |
| $F_k$     | [N/mm <sup>2</sup> ] | prekidna sila   |
| $G$       | [N]                  | sila razvoja pukotine   |
| $H_s$     | [m]                  | značajna valna visina   |
| $K$       |                      | faktor intenzivnosti naprezanja   |
| $K_I$     |                      | faktor intenzivnosti naprezanja za prvi način otvaranja pukotine          |
| $K_{IC}$  |                      | kritičan faktor intenzivnosti naprezanja za prvi način otvaranja pukotine |
| $K_{II}$  |                      | faktor intenzivnosti naprezanja za drugi način otvaranja pukotine         |
| $K_{III}$ |                      | faktor intenzivnosti naprezanja za treći način otvaranja pukotine         |
| $l$       | [mm]                 | ukupna duljina epruvete   |
| $L_0$     | [mm]                 | početna mjerna duljina epruvete   |
| $l_0$     | [mm]                 | duljina mjerenog dijela epruvete  |
| $L_c$     | [mm]                 | duljina uskog paralelnog dijela epruvete                                  |
| $L_u$     | [mm]                 | konačna mjerna duljina epruvete   |
| $m$       |                      | parametar S-N krivulje (negativni recipročni nagib)                       |
| $N_g$     |                      | broj ciklusa na prijelazu između vremenske i trajne čvrstoće              |
| $r$       |                      | koeficijent asimetrije ciklusa naprezanja                                 |
| $R_e$     | [N/mm <sup>2</sup> ] | granica razvlačenja   |
| $R_{eh}$  | [N/mm <sup>2</sup> ] | gornja granica razvlačenja  |

|                     |                      |   |
|---------------------|----------------------|---|
| $R_{eL}$            | [N/mm <sup>2</sup> ] | donja granica razvlačenja   |
| $R_k$               | [N/mm <sup>2</sup> ] | konačno naprezanje  |
| $R_m$               | [N/mm <sup>2</sup> ] | vlačna čvrstoća   |
| $R_{p\ 0,2}$        | [N/mm <sup>2</sup> ] | konvencionalna granica tečenja  |
| $S_0$               | [mm <sup>2</sup> ]   | početna površina presjeka epruvete  |
| $T_s$               | [s]                  | dominantni period za svaku valnu visinu   |
| $W$                 | [J]                  | rad koji se može apsorbirati do popuštanja  |
| $\gamma$            | [J/mm <sup>2</sup> ] | energija potrebna za stvaranje nove površine unutar materijala                          |
| $\gamma_p$          | [J]                  | rad plastične deformacije potreban za formiranje jedinične površine pukotine            |
| $\varepsilon_{Ael}$ | [mm/mm]              | deformacija koja nakon rasterećenja iščezava  |
| $\varepsilon_{Apl}$ | [mm/mm]              | plastična deformacija   |
| $\varepsilon_m$     | [mm/mm]              | istezanje kod vlačne čvrstoće   |
| $\varepsilon_u$     | [mm/mm]              | ukupno istezanje  |
| $\sigma$            | [N/mm <sup>2</sup> ] | naprezanje  |
| $\sigma_a$          | [N/mm <sup>2</sup> ] | amplituda naprezanja ciklusa  |
| $\sigma_c$          | [N/mm <sup>2</sup> ] | kritično vlačno naprezanje pri kojem se lom odvija bez dodatnog utroška energije        |
| $\sigma_D$          | [N/mm <sup>2</sup> ] | trajna dinamička čvrstoća   |
| $\sigma_m$          | [N/mm <sup>2</sup> ] | srednje naprezanje ciklusa  |
| $\sigma_{max}$      | [N/mm <sup>2</sup> ] | maksimalno naprezanje ciklusa   |
| $\sigma_{min}$      | [N/mm <sup>2</sup> ] | minimalno naprezanje ciklusa  |
| $\sigma_o$          | [N/mm <sup>2</sup> ] | amplituda osnovnog opterećenja  |
| $\sigma_{r,N}$      | [N/mm <sup>2</sup> ] | vremenska dinamička čvrstoća za trajnost u ciklusima $N$                                |
| $\sigma_{teo}$      | [N/mm <sup>2</sup> ] | maksimalno naprezanje koje idealna kristalna rešetka izdrži bez prekidanja atomske veze |
| $\Delta\sigma$      | [N/mm <sup>2</sup> ] | raspon naprezanja   |
| $\Delta\sigma_R$    | [N/mm <sup>2</sup> ] | referentna vrijednost dinamičke čvrstoće kod konstrukcijskog detalja                    |
| $\nu$               | [%]                  | Poissonov koeficijent   |

## SAŽETAK

U ovom radu ispitana su dinamička svojstva brodograđevinskog čelika. Za potrebe dinamičkih ispitivanja najprije je proveden statički vlačni pokus kako bi se na temelju dobivenih podataka o vlačnoj čvrstoći i granici elastičnosti mogli odrediti parametri za dinamička ispitivanja.

Epruvete su opterećene varijabilnima cikličkim opterećenjem čije amplitude i odgovarajući broj ciklusa su proporcionalne visinama valova i njihovim učestalostima u području sjevernog Atlantika. Da bi se utvrdio utjecaj vremenskog redoslijeda opterećenja na zamor materijala kreirana su dva različita spektra opterećenja: Spektar I i Spektar II. U Spektaru I su amplitude naprezanja išle od minimalne do maksimalne vrijednosti, dok su u Spektaru II amplitude naprezanja išle od maksimalne do minimalne vrijednosti unutar spektra. Maksimalne amplitude u spektru određene su tako da se ispitivanja mogu provesti u prihvatljivom vremenskom roku, 8-15 sati po ispitnom uzorku. Vrijednosti maksimalnih amplituda naprezanja prelazile su granicu elastičnosti materijala, a ukupan broj ciklusa bio je do  $10^6$  tako da ovo ispitivanje spada u područje niskocikličnog zamora.

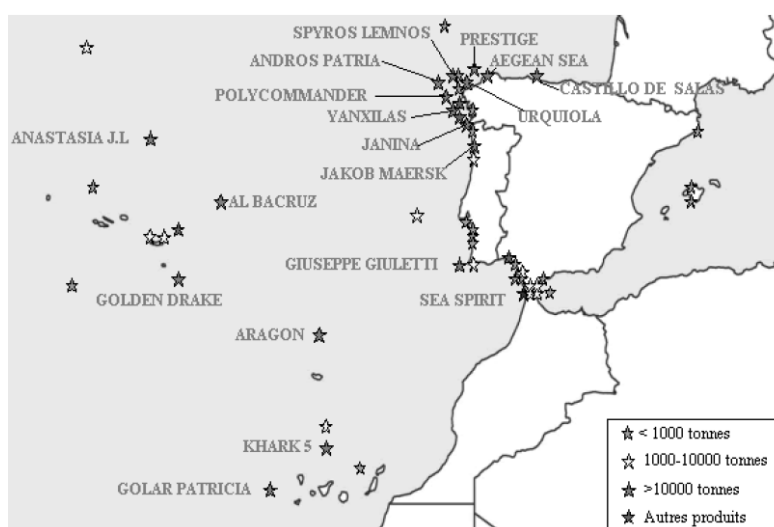
Usporedbom rezultata ispitivanja epruveta Spektrom I i Spektrom II s velikom sigurnošću se može zaključiti da na dinamičku izdržljivost u području niskocikličkog zamora značajan utjecaj ima vremenski redoslijed pojavljivanja pojedinih amplituda opterećenja unutar spektra.

Ključne riječi: brodograđevinski čelik, dinamička izdržljivost, spektar opterećenja

## 1. UVOD

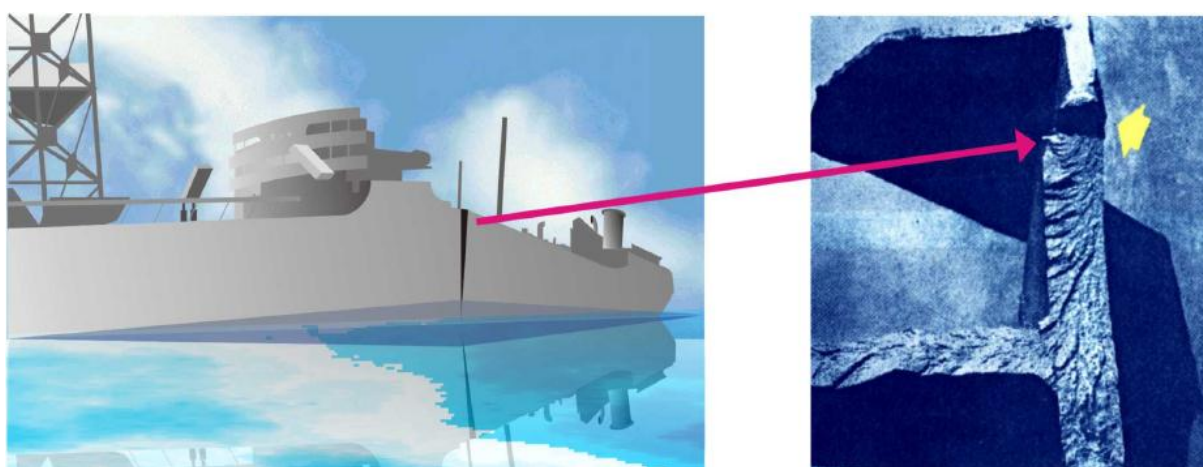
Mehaničko svojstvo koje karakterizira otpornost materijala prema pojavi umora materijala naziva se dinamička izdržljivost. Svrha ispitivanja dinamičke izdržljivosti je utvrđivanje ponašanja materijala, konstrukcije ili dijelova strojeva, u uvjetima dugotrajnog djelovanja promjenjivog dinamičkog naprezanja [1].

Stalan razvoj gospodarstva izravno utječe na rast potrebe za različitim vrstama energije. Danas je čovjek još uvijek uvelike ovisan o fosilnim gorivima i energijom iz njih. Najveći dio fosilnih goriva danas se transportira putem mora. Prijevoz tih golemih količina rudnih bogatstava (nafte, plina, ugljena) otvara mogućnosti onečišćenja mora i obale o čemu svjedoče i brojne ekološke katastrofe. Pomorske nesreće osobito tankera za prijevoz ulja i rasutih tereta donose velike ekološke katastrofe, gubitke ljudskih života ali i velike ekonomske gubitke. Američki tanker Exxon Valdez nasukao se 1989 g. kraj obala Aljaske zagađivši priobalje i more sa 36.000 tona nafte te onemogućio ulov ribe u narednih 7 godina. Grčki tanker Prestige potonuo je 2002 g. kod obale španjolske, prilikom potonuća ispustio je u more oko 70 000 tona nafte što je izazvalo pravi pomor životinjskih vrsta i zagađilo desetke kilometara obale i velike površine na dnu oceana (slika 1). To naravno nisu jedini primjeri potonuća tankera prilikom kojih su nastale ekološke katastrofe. Sve učestalije takve nesreće vratile su zamor detalja brodskih konstrukcija, koji je prepoznat kao uzročnik takvih problema, u žižu zanimanja istraživača diljem svijeta [2].



Slika 1. Područja najvećih tankerskih nezgoda [3]

Zamor materijala kao posljedica starenja i akumulativnih pojava oštećenja u brodskim konstrukcijama mogu izazvati oštećenja koja mogu dovesti čak i do loma brodskih konstrukcija. Posebni interes za proučavanje problema loma nametnut je čestim lomovima brodova tipa Liberty, koji su proizvedeni u SAD prije i tijekom drugog svjetskog rata. Od 4694 zavarene konstrukcije brodova ovog tipa 1289 pretrpjelo je teške havarije, a njih 233 se slomilo na dva dijela (slika 2). Lomovi tih brodova nastali su u uvjetima koji su u to vrijeme bili neobjašnjivi (u doku pri relativno mirnom vremenu) [4]. Takvi lomovi događali su se i na drugim konstrukcijama (mostovi, stupovi, cjevovodi i sl.) i bili su poseban izazov za istraživače, pa se velik broj istaknutih znanstvenika upustio u analizu problema loma.



**Slika 2. Lom jednog od brodova tipa Liberty i inicijalna pukotina koja je uzrokovala krhki lom trupa broda [4]**

Naravno ne mogu se sve pomorske nesreće na moru pripisati popuštanju konstrukcije, međutim statistika pokazuje da je 15 % svih nesreća izazvalo upravo popuštanje konstrukcije uslijed zamora materijala [5]. Zamor posebno u sprezi s djelovanjem korozije značajan je izvor oštećenja brodskih konstrukcija.

Pukotine izazvane umorom najčešće započinju na mjestima gdje postoje koncentracije naprezanja, kao što su strukturni diskontinuiteti, velike promjene krutosti, neuravnoteženosti, linije zavora, itd. Kako se pukotine šire, smanjuje se gornja granica nosivosti konstrukcije dok se oštećenje od zamora akumulira toliko da konstrukcija zakaže već kod normalnog radnog opterećenja. Tri su faze loma kod zamora materijala: početna pukotina, širenje pukotine i konačan lom. U procjenjivanju djelovanja zamora odlučujući utjecaj imaju ciklička opterećenja. Vremensko razdoblje za stvaranje i širenje pukotine ovisi o djelujućem naprezanju. Kod malog opterećenja (visoko ciklički zamor) najveći dio vremena do konačnog loma je u iniciranju pukotine. Pri visokim opterećenjima (nisko ciklički zamor), pukotine se

formiraju vrlo rano. Tijekom eksploatacije, brodska konstrukcija izložena je vremenski promjenjivim razinama naprezanja, uslijed valnih opterećenja, sila inercije izazvanih ubrzanjem broda i drugih dinamičkih opterećenja, kao što su ona prenesena putem porivnih strojeva i brodskih vijaka. Pokazalo se da je pulsirajući hidro dinamički tlak na trup broda, uslijed valova i gibanja broda, glavni uzrok zamornog oštećenja uzdužnjaka broda [5]. Dimenzioniranje brodskih konstrukcija se ne može izvršiti samo na temelju mehaničkih karakteristika dobivenih statičkim vlačnim pokusom, već je neophodno ispitati i zamorno ponašanje materijala što je jedan od ciljeva ovog rada.



## 1.1. Hipoteza rada

Pri dinamičkom naprezanju koje može biti i znatno niže od granice razvlačenja materijala, nakon nekog vremena može doći do loma. Posljedica toga je pojava zamora materijala, odnosno postupnog razaranja materijala zbog dugotrajnog djelovanja dinamičkog naprezanja čije je rezultat pojava pukotine i lom strojnog djela. Zbog toga je prilikom odabira materijala za konstrukcije koje su dinamički opterećene neophodno izvršiti i ispitivanja dinamičke izdržljivosti materijala. U radu se nastoji pokazati da na dinamičku izdržljivost osim raspona naprezanja ima i vremenski redoslijed pojavljivanja pojedinih amplituda u spektru naprezanja.

## 1.2. Povijesni pregled proučavanja zamora materijala

Već tijekom tridesetih godina 19. stoljeća dogodili su se prvi pokusi na temu zamora materijala. Ispitivanja su se provodila na lancima na tračnim konvejerima na kojima je dolazilo do neobjašnjivih lomova, a provodio ih je 1837. godine W.A.J. Albert [6].

Sljedeći značajan korak u razumijevanju fenomena zamora donijela su istraživanja Augusta Wöhlera koji je u razdoblju od 1850.-tih do 1860.-tih godina provodio ispitivanja učestalih lomova željezničkih osovina u službi. Prvi je uočio slučajeve lomova konstrukcije kod kojih je naprezanje bilo niže od granice popuštanja. Na temelju svojih ispitivanja zaključivao je o sposobnosti osovina za službu. 1870 godine postavio je temelje za izučavanje zamora zaključcima o većem utjecaju raspona naprezanja od utjecaja maksimalnog naprezanja na zamorni vijek materijala. Također je zaključio da se sa smanjenjem amplitude opterećenja produljuje radni vijek, te da postoji donja vrijednost amplitude naprezanja ispod koje lom neće nastupiti ni kod beskonačnog broja ciklusa opterećenja (dinamička izdržljivost ili trajna dinamička čvrstoća) [6]. Wöhler je rezultate svojih pokusa predstavio u obliku tablica, a S-N krivulje se Wöhlerovim imenom nazivaju od 1936. godine.

Početkom 20. stoljeća prvi put je upotrijebljen optički mikroskop za proučavanje mehanizma umora materijala. Uočene su lokalne linije klizanja koje dovode do formiranja mikropukotina. 1920. godine A. Griffith objavljuje rezultate svojih teorijskih proračuna i pokusa krhkog loma stakla [6]. Otkrio je da prisutnost mikro pukotina smanjuje čvrstoću stakla, a da to smanjenje ovisi o duljini pukotine  $a$ , te je postavio jednadžbu  $\sigma \cdot \sqrt{a} = \text{konst.}$ , gdje je  $\sigma$  nazivno naprezanje kod loma. Zaključio je da materijal uvijek sadrži pukotine, bez

obzira koliko homogeno izgledao i da je stoga stvarna čvrstoća materijala uvijek niža od teorijske. Svojim radom Griffith je 1924. postao i utemeljiteljem mehanike loma.

Daljnji naponi uloženi u pronalaženje pogodne teorije, koja bi omogućavala pouzdanu procjenu čvrstoće i vijeka trajanja dinamičkih opterećenih elemenata strojeva i konstrukcija, urodili su poznatom Palmgren-Minerovom teorijom linearnog gomilanja oštećenja uslijed zamora, koja glasi:

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} \geq D \quad (1)$$

,gdje je  $n_i$  broj ciklusa pri maksimalnom naprezanju  $\sigma_i$ ,  $N_i$  je broj ciklusa do loma tj. trajnost na nivou naprezanja  $\sigma_i$ ,  $i$  je broj blokova naprezanja konstantne amplitude, a  $D=0.5...5$  konstanta dobivena eksperimentalno, čija hipoteza se često koristi i danas.

Veliki doprinos istraživanja umora materijala 1950.-tih godina predstavlja uvođenje elektrohidrauličkih ispitnih sustava, koji su omogućili ispitivanja stvarnim opterećenjima uzorka, komponenti i čitavih mehaničkih sustava. Primjena elektronskog mikroskopa omogućila je bolje razumijevanje osnovnih zamornih mehanizama. Irwin prvi uvodi faktor intenzivnosti naprezanja  $K$ , koji se prihvatio kao osnova za linearno elastičnu mehaniku loma. Paris i Erdogan 1963. godine pokazuju da se rast zamorne pukotine najbolje može opisati preko raspona faktora intenziteta naprezanja  $\Delta K$ . Njihov zakon se i danas najviše upotrebljava za proračun rasta pukotine i procjenu preostalog životnog vijeka materijala s pukotinom [7].

## 2. BRODSKE KONSTRUKCIJE

Današnja globalizacija povezuje gospodarstva najudaljenijih zemalja, te se otvaraju tržišta za proizvode iz svih dijelova svijeta. Rezultat takvog otvorenog tržišta je sve oštrija konkurencija koja tjera proizvođače na stvaranje što kvalitetnijih proizvoda, uz što niže troškove. Kao i u svim drugim ljudskim djelatnostima, to ima utjecaj i na gradnju brodova.

Krize u Sueskom kanalu koji je glavni tankerski put za opskrbu Europe naftom sa Bliskog istoka tj. njegovo zatvaranje primorale su brodovlasnike na gradnju sve većih tankera za prijevoz nafte.

Osnovni čimbenici u konstrukciji broskog trupa koje projektanti moraju uzeti u razmatranje su materijali, spojevi, namjena broda, opterećenje oslanjajući se općenito na višestoljetno iskustvo gradnje brodova te na nauku o čvrstoći dopunjenu s teorijama čvrstoće broda [8]. Zahtjev za povećanjem nosivosti dovodi do optimiziranja konstrukcije i smanjenja težine trupa. Smanjuju se dimenzije elemenata konstrukcije, a sve više se koristi i čelik povišene čvrstoće, što rezultira povišenjem opće razine naprezanja. Do problema sa zamorom došlo je zbog nastavka primjene uobičajenih konstrukcijskih detalja, izrađenih uobičajenim postupcima (zavarivanja), u novim okolnostima. Slično tome, prilikom projektiranja i gradnje novih vrsta brodova, u nedostatku pravog, koristilo se iskustvo utemeljeno na sličnim brodovima. Kao zaključak, može se reći da je učestala pojava zamora na brodskim konstrukcijama u posljednjih dvadesetak godina posljedica svojevrsne ekstrapolacije koncepata konstruiranja, primjene starih iskustava u projektiranju i gradnji brodova u izmijenjenim okolnostima.

### 2.1. Projektiranje brodskih konstrukcija

Brodovi su vrlo veliki i složeni sustavi koji su i sami dio još većih i složenijih sudstava (ukrcaj, iskrcaj, transport...). Brodske konstrukcije se mogu smatrati podsustavima koji omogućuju uključivanje ostalih podsustava i njihovo zajedničko djelovanje u službi broda. Prije početka projektiranja broda potrebno je odrediti neke bitne parametre kao što su: funkcija i tip broda, služba broda, područje plovidbe i glavne izmjere (visina, širina, duljina, gaz) [8]. Detaljno projektiranje brodske konstrukcije započinje na osnovi pravila

klasifikacijskih društava za gradnju trupa broda, a tek se tako razvijena detaljno razrađena konstrukcija podvrgava složenijim provjerama. Nadzor od klasifikacijskih društava, neovisnih inspektora i nadzornih jedinica provodi se tijekom svih faza projektiranja i gradnje trupa broda i nastavlja se za vrijeme cijelog životnog vijeka broda u službi.

Projektiranje i sam pristup projektiranju brodskih konstrukcija može se podijeliti u nekoliko razina: iskustveni pristup, poluiskustveni pristup - primjena nauke o čvrstoći i primjena teorija brodskih konstrukcija, razboriti pristup [8]

Brodski trup se najvećim dijelom sastoji od valjanih limova te valjanih i sastavljenih profila koji po određenim specifikacijama brodogradilišta, isporučuju čeličane pod nadzorom klasifikacijskih društava.

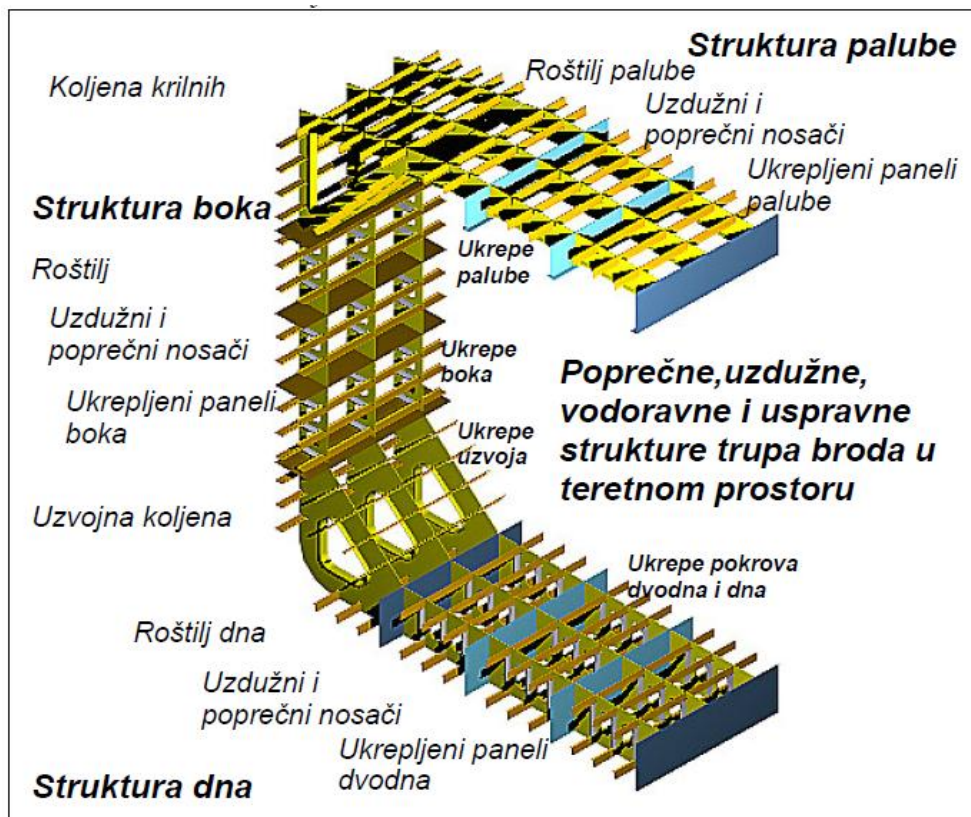
## **2.2. Entiteti čvrstoće brodskih konstrukcija**

Svojstvo je broskog trupa da u cijelosti i mjestimično preuzme i izdrži sva globalna i lokalna opterećenja u predviđenom vijeku korištenja broda u službi. Čvrstoću broda u najvećoj mjeri određuju materijal trupa, dimenzije, razmještaj i spojevi građevnih elemenata. Čvrstoća broda se procjenjuje usporedbom odaziva trupa u obliku radnih naprezanja i deformacija u službi, sa izdržljivosti trupa koju određuju dopuštena naprezanja i deformacije kao svojstva materijala [8].

Nauka o čvrstoći i teorija brodskih konstrukcija raspolažu s teorijskim postupcima i entitetima različitih stupnjeva složenosti koji se primjenjuju u proračunima čvrstoće pri projektiranju konstrukcija broskog trupa. Vrlo je važno u brodskoj konstrukciji prepoznati entitete koji podliježu nauci o čvrstoći i pridijeliti im ona svojstva koja najbolje opisuju stvarni dio broda. Na kraju je vrlo važno dobro ocijeniti u kojoj je mjeri idealizacija stvarnosti prihvatljiva s obzirom na razinu točnosti proračuna i sigurnosti rezultata i same konstrukcije u konačnici [8].

Najjednostavnije entitete iz nauke o čvrstoći koji se susreću na brodu predstavljaju štapovi opterećeni na vlak ili tlak i gredni nosači opterećeni na savijanje. I jedni i drugi su oslonjeni na svojim krajevima upeto ili zglobovito na različite načine. Složeniji entiteti iz nauke o čvrstoći koje je preuzela teorija brodskih konstrukcija su sustavi nosača koji tvore brodske okvire različitih usmjerenja (poprečni, uzdužni, vodoravni, uspravni) koji preuzimaju

opterećenja u svojim ravninama. Na slici 3 prikazani su entiteti teorije čvrstoće u brodskim konstrukcijama.



Slika 3. Entiteti teorije čvrstoće u brodskim konstrukcijama [8]

### 2.3. Zamor materijala brodskih konstrukcija

Za vrijeme službe brodske konstrukcije izložene su različitim vrstama promjenjivih opterećenja:

- opterećenjima na mirnoj vodi,
- opterećenjima na valovima,
- toplinska naprezanja,
- dinamička naprezanja uslijed vibriranja (glavni motor, vijak),
- udarna opterećenja (udaranje pramca o valove)

Razlikuju se tri tipa opterećenja brodskih konstrukcija s obzirom na njihovu učestalosti [5]:

- opterećenja niske učestalosti - sva opterećenja na mirnoj vodi, tj. promjene vanjskog i unutarnjeg tlaka (uzgon i ukrcani tereti) koje su posljedica različitih stanja krcanja broda; temperaturne promjene, dokovanje broda,

- opterećenja srednje učestalosti - valovima izazvana dinamička raspodjela tlaka na trupu broda uslijed nailaženja valova i gibanja broda, zapljuskivanje tekućih tereta, zapljuskivanje valova na bokove broda i pramčani dio palube, inercijska opterećenja,
- opterećenja visoke učestalosti - udaranje pramca o valove, prisilne vibracije od rada glavnog i pomoćnog motora, promjene tlaka od rada vijaka, pružanje broda.

Prilikom procjene zamora razmatraju se samo opterećenja koja su posljedica promjena stanja krcanja broda, vanjski hidrodinamički tlak od valova i unutarnja inercijska opterećenja. Valovima izazvana opterećenja uključuju globalna i lokalna opterećenja koja se računaju prema kriterijima klasifikacijskih društava.

Zamorna oštećenja zavarenih spojeva brodske konstrukcije posljedica su djelovanja niza promjenjivih opterećenja koja se mijenjaju tokom službe broda. Kao osnovne karakteristike zamora materijala zavarenih spojeva na brodskim konstrukcijama mogu se navesti kako slijedi [9]:

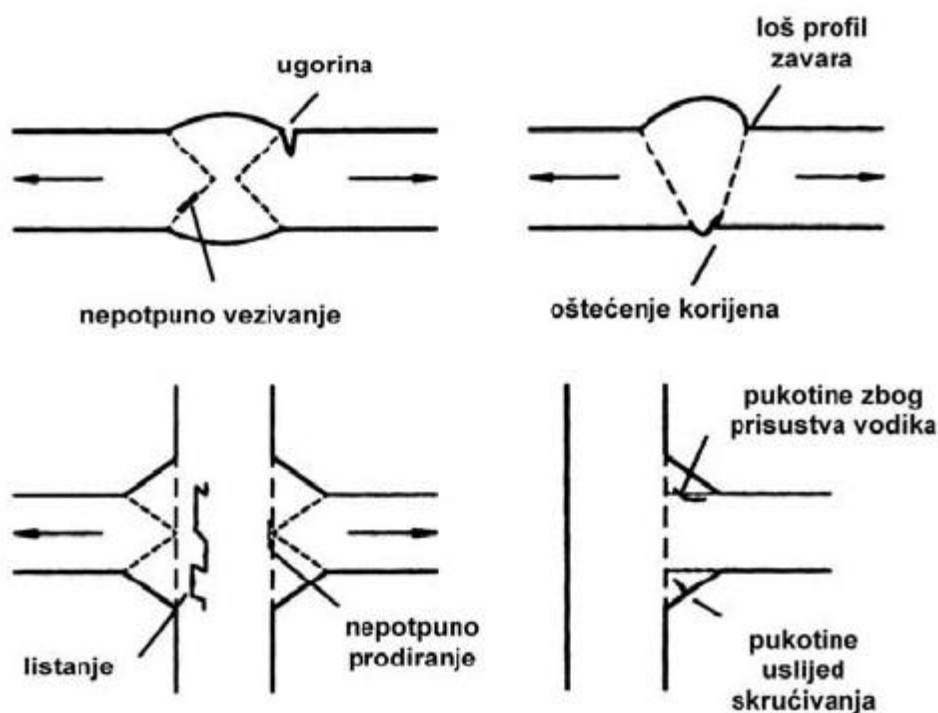
- neizbježno postojanje malih pukotina (manjih od 0.5mm) koje se ne daju otkriti uobičajenim metodama pregleda
- pukotine napreduju najčešće zbog fluktuirajućeg valnog opterećenja
- zamorno oštećenje je kumulativno, jer ponavljajuća ciklička opterećenja dovode do sve većeg oštećenja. Zato se koristi pojam akumulirano zamorno oštećenje.
- iako mali broj ekstremnih naprezanja može doprinijeti akumuliranom zamornom oštećenju, najveći doprinos oštećenju dolazi od učestalih naprezanja malog opsega
- loše oblikovani konstrukcijski detalji značajno povećavaju zamorna naprezanja
- korozija i morsko okruženje nepovoljno djeluju na dinamičku izdržljivost i ubrzavaju rast pukotine.
- neuravnanosti i zaostala naprezanja koja se unose u tehnološkom procesu gradnje broda često nepovoljno utječu na dinamičku izdržljivost.

### 2.3.1. Oštećenja u zavarenim spojevima

Oštećenja su uvijek prisutna u zavarenim spojevima i možemo ih smatrati urođenim značajkama svakog zavora. Zamor takvih spojeva uglavnom predstavlja fenomen rasta pukotine, budući da je početna duljina pukotine već tolika da se može smatrati da je potpuno preskočena faza njenog začetka. Ovo osobito vrijedi kod ravninskih pogrešaka, koje su stoga i najopasnije. Tek naknadna primjena metoda poboljšavanja dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva može ublažiti negativne učinke oštećenja (slika 4).

Tri su osnovne grupe u koje se mogu svrstati pogreške u zavarenim spojevima [10]:

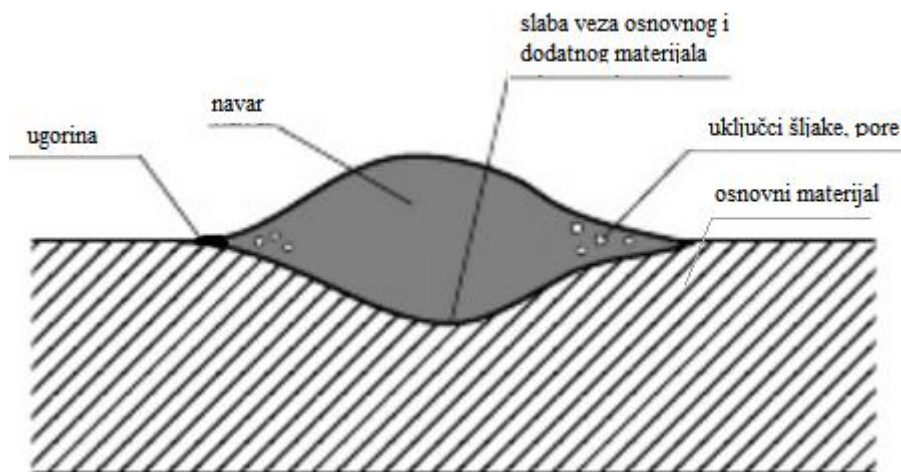
- nesavršenosti oblika (linearno i kutno nepodudaranje, ugorine)
- prostorne pogreške (poroznost, uključine šljake, uključine metala)
- ravninske pogreške (pukotine, nepotpuno vezivanje, nepotpuno prodiranje).



Slika 4. Različite vrste oštećenja zavara [11]

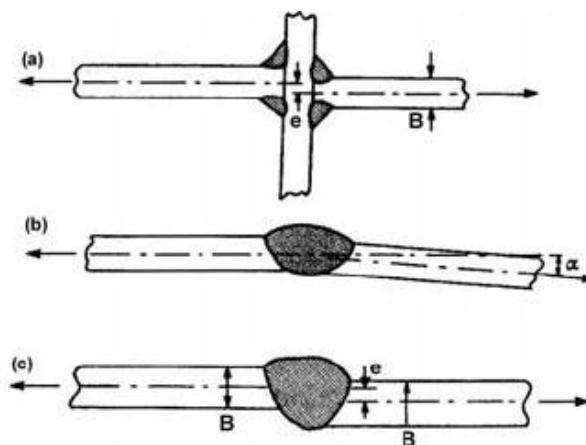
Kod zavarenih spojeva sniženje dinamičke čvrstoće je izazvano zarezim djelovanjem samog zavora. Čak i nazivno savršen zavar sadrži oštećenja, pa se razlikuju [10]:

- unutrašnji zarezi - pore, uključci plinova, korijen zavora, mjesta prekida elektrodna,
- vanjski zarezi - krajnji krateri, ugorine, prijelaz dodatnog na osnovni materijal



**Slika 5. Mikroskopske pogreške u zavaru kao izvor zarezno djelovanja**

Nepodudaranje - netočnosti pri spajanju limova dovode do njihovog nepodudaranja, tako da zavareni spojevi u praksi često odstupaju od oblika koji je zamislio projektant. Razlikujemo linearno i kutno nepodudaranje, a osobito su osjetljivi križni i sučeonni zavari (slika 6).



**Slika 6. Primjeri nepodudaranja; a) linearno kod križnog spoja, b) kutno kod sučeonog spoja, c) linearno kod sučeonog spoja [2]**

U slučaju uzdužnog opterećenja takvog spoja okomito na liniju nepodudaranja, dolazi do koncentracije naprezanja zbog javljanja sekundarnih naprezanja savijanja. Porast naprezanja kod sučeljenih zavara može iznositi i do 30%, a kod križnih spojeva čak i do 45%, što uzrokuje osjetno smanjenje dinamičke čvrstoće.

Ugorine - zarezno djelovanje ugorina izaziva veliki pad dinamičke izdržljivosti. Ugorine koje su kod statičkih opterećenja još dopustive, snižavaju dinamičku izdržljivost kod











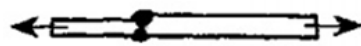



sučelnih zavarenih spojeva i do 50%. Ako se ugorine izbruse uz kontinuirani prijelaz pa i smanjenje presjeka 3-5 %, može se znatno poboljšati dinamička izdržljivost.

Uključci šljake, pore - već i mali uključci šljake znatno snižavaju dinamičku izdržljivost materijala. Opasne su greške u vidu malih uzdužnih pukotina (prskotina) kao i greške u vezi osnovnog i dodatnog materijala. Okrugle pore imaju puno manje zarezno djelovanje od prskotina.

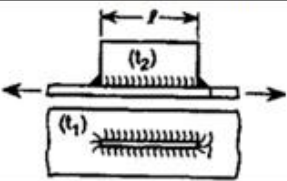
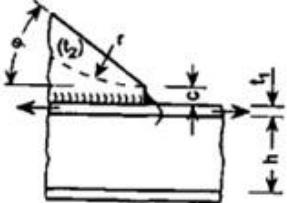
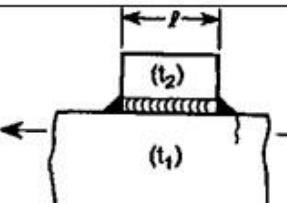
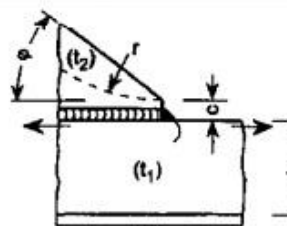
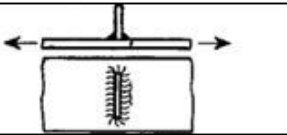
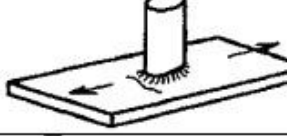
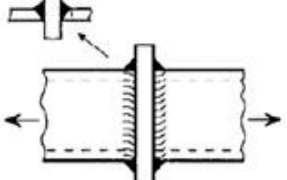
Postoje još mnogi utjecajni parametri na dinamičku izdržljivost zavarenog spoja, a posebno veliki utjecaj na visinu dinamičke čvrstoće ima i položaj zavora prema zavarivaču koji može biti: horizontalni, vertikalni, nadglavan. Nastoji se uvijek zavarivati u horizontalnom položaju jer donosi najviše vrijednosti dinamičke čvrstoće.

Prema pravilima Hrvatskog registra brodova u tablici 1 su prikazani utjecaji pojedinih tipova zavarenog spoja na veličinu dinamičke izdržljivosti, tj kategorije detalja  $\Delta\sigma_R$ . Kategorija detalja je referentna vrijednost zamorne čvrstoće dobivene iz Wöhlerove krivulje u  $2 \cdot 10^6$  ciklusa naprezanja [12].

**Tablica 1. Kategorije detalja zavarenih spojeva**

| Tip br. | Oblik spoja koji prikazuje način Zamornog loma i razmatrano naprezanje   | Opis spoja  | Kategorija detalja $\Delta\sigma_R$ |
|---------|--|---|-------------------------------------|
| 1       |   | Poprečni sučeoni zavar poravnan do lima, 100% IRB (Ispitivanje bez razaranja)   | 112                                 |
| 2       |   | Poprečni sučeoni zavar izrađen u horizontalnom položaju u radionici, maks. Pojačan 1 [mm] + 0,1 x širina zavora, glatki prijelaz, IRB | 90                                  |
| 3       |   | Poprečni sučeoni zavar koji ne zadovoljava uvjete tipa br. 2  | 80                                  |
| 4       | <br>   | Poprečni sučeoni zavar s podložnom pločicom ili spoj tri lima s neopterećenim odvojkom  | 71                                  |
|         |  |   | 80                                  |
| 5       | <br><br><br><br><br> | Poprečni sučeoni zavari između limova različitih širina ili debljina, IRB   |                                     |
|         |  | - Kao za tip br. 2, nagib 1:5   | 90                                  |
|         |  | - Kao za tip br. 2, nagib 1:3   | 80                                  |
|         |  | - Kao za tip br. 2, nagib 1:2   | 71                                  |
|         |  | - Kao za tip br. 3, nagib 1:5   | 80                                  |
|         |  | - Kao za tip br. 3, nagib 1:3   | 71                                  |
|         |  | - Kao za tip br. 3, nagib 1:2   | 63                                  |
|         |  | Nagib za treći skicirani slučaj proizlazi iz omjera razlike u debljini limova prema širini zavarenog spoja                            |                                     |
| 6       |   | Poprečni sučeoni zavar zavaren bez podloge i bez potpune penetracije  |                                     |
|         |  | - korijen kontroliran sa IRB  | 71                                  |
|         |  | - bez IRB   | 36                                  |

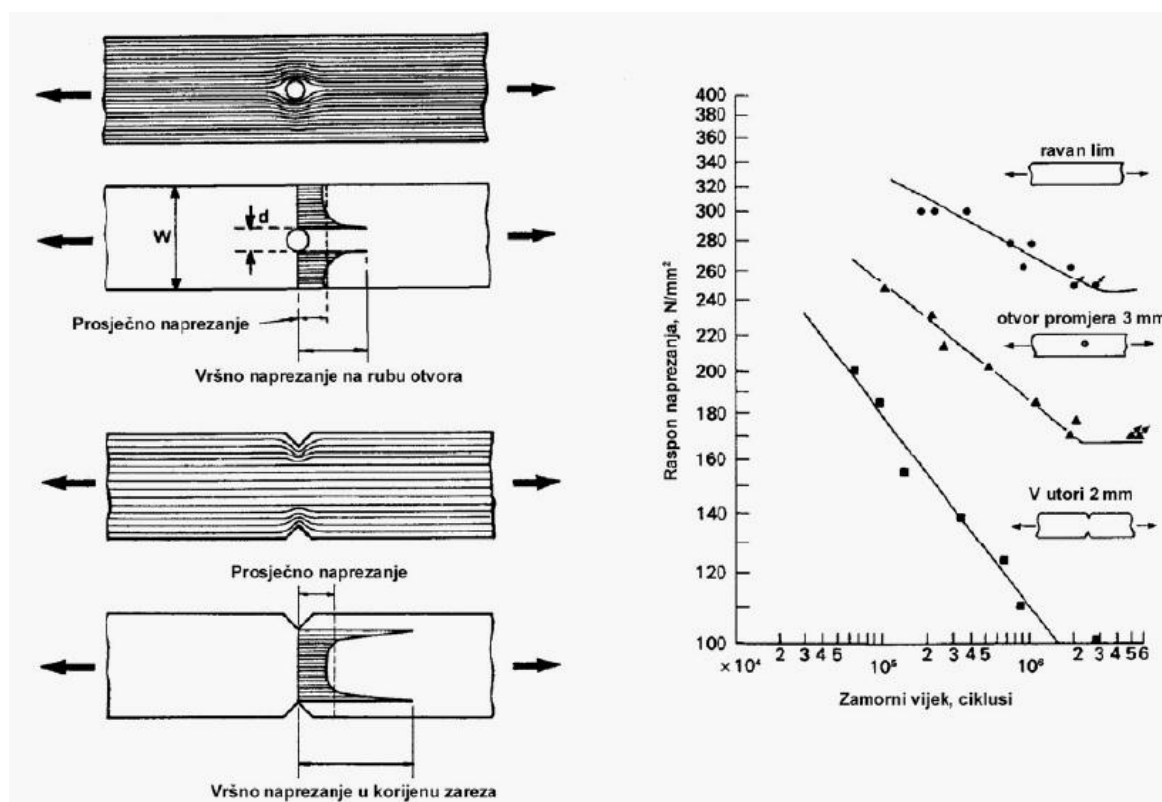
Tablica 1. - nastavak

| Tip br. | Oblik spoja koji prikazuje način Zamornog loma i razmatrano naprezanje              | Opis spoja  | Kategorija detalja $\Delta\sigma_R$ |
|---------|---|---|-------------------------------------|
| 13      |    | Uzdužno kutno zavarena ploča:<br>$l \leq 50 \text{ mm}$<br>$50 \text{ mm} < l \leq 150 \text{ mm}$<br>$l > 300 \text{ mm}$<br>za $t_2 \leq 0,5 \cdot t_1$ , $\Delta\sigma_R$ se može povećati za jednu kategoriju ali ne vrijedi više od 80   | 80<br>71<br>63<br>56                |
| 14      |    | Pločica s blagim prijelazom (skošeni ili kružno oblikovani kraj) zavarena na limu struka ili pojasa<br>$c \leq 2 \cdot t_2$ , maksimalno 25 mm<br>$r \geq 0,5 h$<br>$r < 0,5 h$ ili $\varphi \leq 20^\circ$<br>$\varphi > 20^\circ$ vidi tip 13<br>za $t_2 \leq 0,5 \cdot t_1$ , $\Delta\sigma_R$ se može povećati za jednu kategoriju                            | 71<br>63                            |
| 15      |    | Uzdužna ravna pločica zavarena na limu ili rubu pojasa:<br>$l \leq 50 \text{ mm}$<br>$50 \text{ mm} < l \leq 150 \text{ mm}$<br>$150 \text{ mm} < l \leq 300 \text{ mm}$<br>$l > 300 \text{ mm}$<br>za $t_2 \leq 0,7 \cdot t_1$ , $\Delta\sigma_R$ se može povećati za jednu kategoriju ali ne vrijedi više od 56   | 56<br>50<br>45<br>40                |
| 16      |   | Uzdužna ravna pločica zavarena na rubu lima, ili rubu pojasa struka, s blagim prijelazom (skošenog ili kružno oblikovanog kraja); $c \leq 2 \cdot t_2$ , maksimalno 25 mm<br>$r \geq 0,5 h$<br>$r < 0,5 h$ ili $\varphi \leq 20^\circ$<br>$\varphi > 20^\circ$ vidi tip 15<br>za $t_2 \leq 0,7 \cdot t_1$ , $\Delta\sigma_R$ se može povećati za jednu kategoriju | 50<br>45                            |
| 17      |  | Poprečne ukrepe zavarene kutnim zavarom   | 80                                  |
| 18      |  | Prključak koji ne podnosi smično opterećenje  | 80                                  |
| 19      |  | Zavar između ploče i šupljog presjeka<br><br>kružni presjek<br>pravokutni presjek<br>za $t \leq 8 \text{ mm}$ , $\Delta\sigma_R$ se može povećati za jednu kategoriju   | 56<br>50                            |

### 2.3.2. Oblikovanje konstrukcijskih detalja

Koncentracija naprezanja znatno smanjuje zamornu čvrstoću. Strukturni elementi trupa redovito sadrže geometrijske nepravilnosti povećanim naprezanjima poput linija zavora, krajeva koljena, otvora i slično [13]. Lokalne promjene presjeka dovode do poremećaja u toku naprezanja, a time i do lokalnog povećanja razine naprezanja iznad prosječne vrijednosti. Velika složenost brodske konstrukcije onemogućava potpuno izbjegavanje koncentrata naprezanja. Vrlo je važno pri konstrukcijskom oblikovanju obratiti pažnju na razmještaj geometrijskih elemenata konstrukcije, te je potrebno posebno izbjegavati gomilanje više koncentrata naprezanja na jednome mjestu, jer njihovo superponiranje dovodi do znatnog povećanja naprezanja što osjetno povećava osjetljivost na zamor.

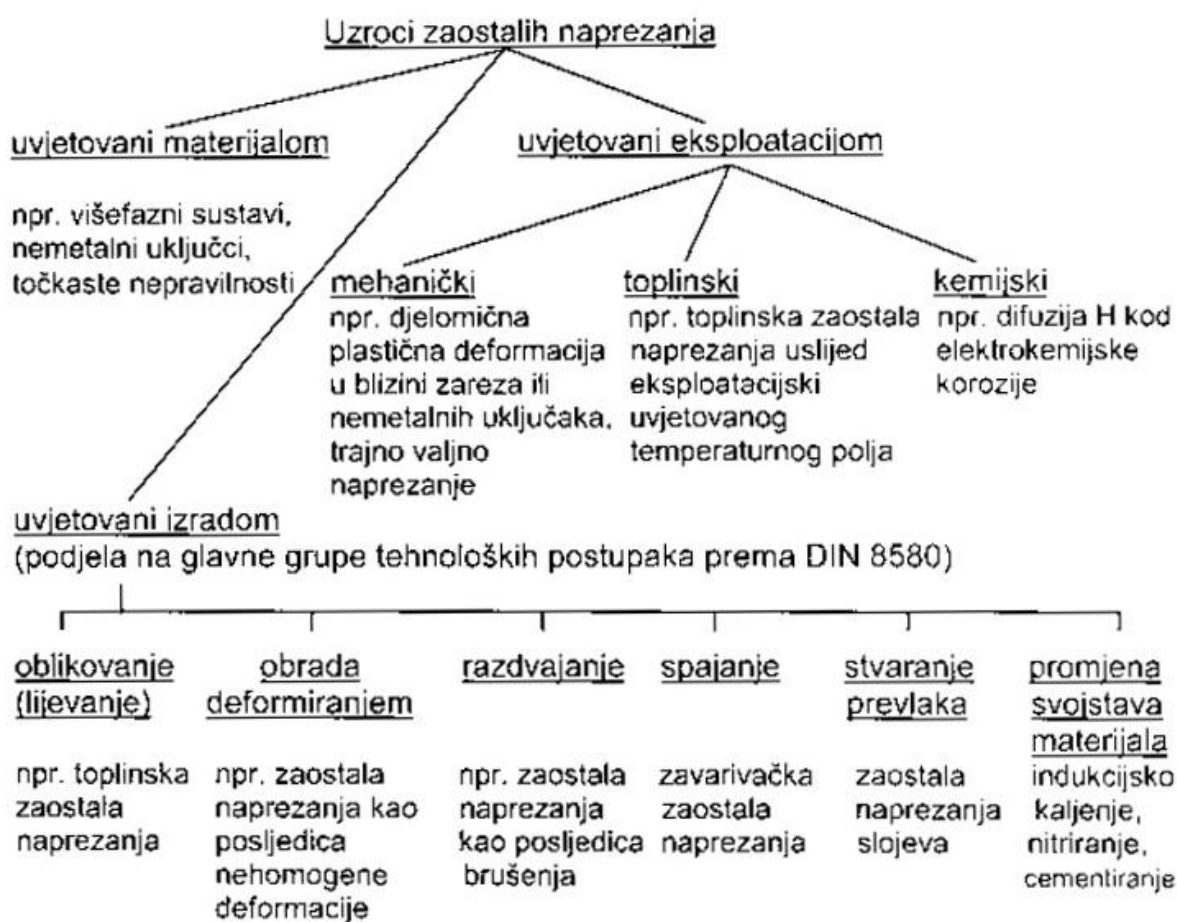
Dvije su najvažnije grupe uzročnika koncentracije naprezanja na makroskopskoj razini. Jednu čine pogreške pri izradi (npr. oštećenja rubova prilikom rezanja plamenom, ili pogreške u zavarenim spojevima), a drugu geometrija konstrukcijskog detalja i geometrija samog zavora. Učinak potonjih na dinamičku čvrstoću jasno pokazuje usporedba neoštećene epruvete, epruvete s otvorom promjera 3 mm i epruvete s V utorima dubine 2 mm, slika 7.



Slika 7. Utjecaj koncentracije naprezanja na dinamičku čvrstoću [9]

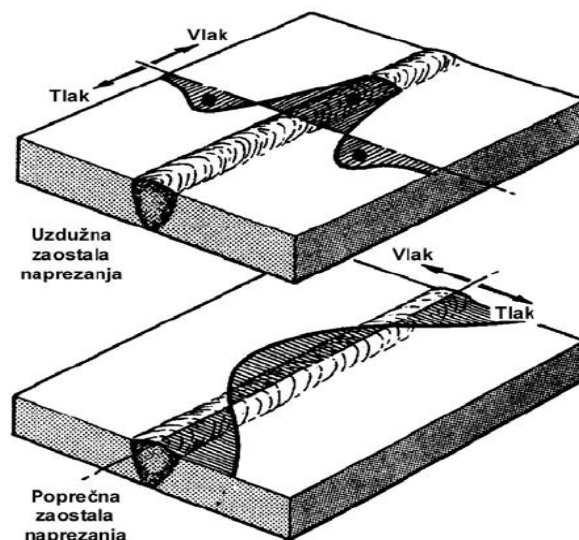
### 2.3.3. Zaostala naprezanja

Zaostala naprezanja su mikro i makro naprezanja prisutna u materijalu bez djelovanja vanjskih sila i momenata u tom trenutku, a nalaze se u mehaničkoj ravnoteži. Spoznaja o veličini zaostalih naprezanja prisutnih u materijalu važna je stoga što se tokom izradbe, te uporabe, superponiraju s naprezanjima koja su rezultat djelovanja vanjskih sila i momenata. Zaostala naprezanja u konstrukciju mogu biti uznesena samim materijalom tokom izrade ili su nastala tokom uporabe. Uzroci pojave zaostalih naprezanja prikazani su na slici 8.



Slika 8. Shematski prikaz uzroka pojave zaostalih naprezanja [1]

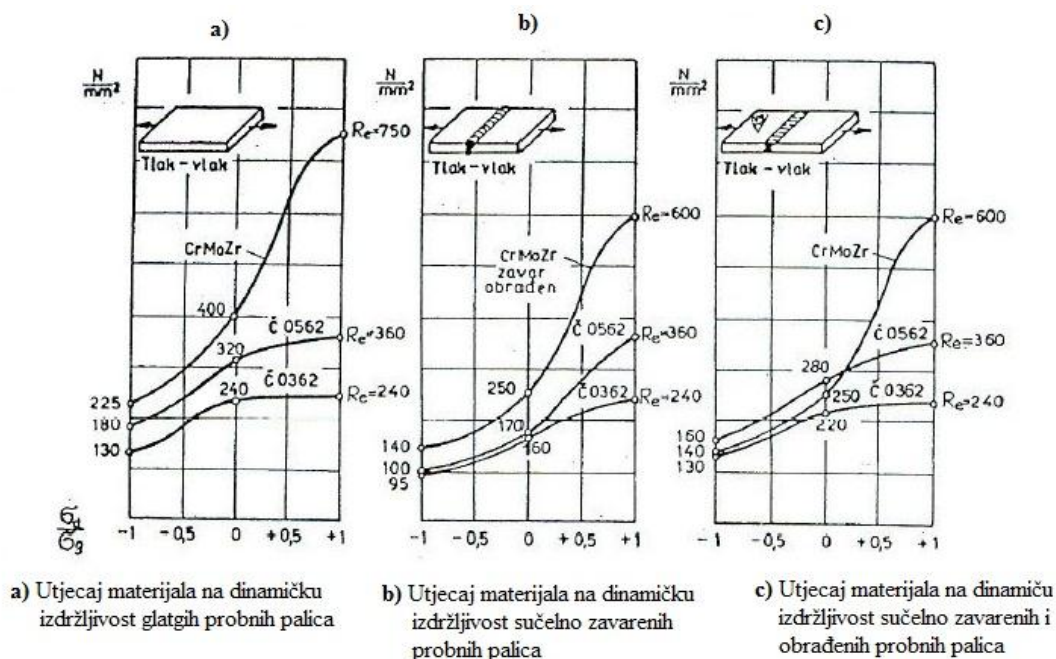
Najčešći uzrok nastanka zaostalih naprezanja u brodskim konstrukcijama je spajanje elemenata konstrukcije zavarivanjem. Za vrijeme zagrijavanja i hlađenja, okolni materijal različite temperature sprečava prirodno širenje i skupljanje materijala u zoni utjecaja topline. Da bi se prilagodio neprirodnoj duljini, metal zavora kojemu je skupljanje onemogućeno mora se plastično deformirati, što stvara polje zaostalih vlačnih naprezanja u njegovoj blizini (slika 9).



Slika 9. Raspodjela zaostalih napreznja u zavarenom spoju [2]

### 2.3.4. Upotreba čelika visoke čvrstoće

Materijali viših dinamičkih svojstava koji su ujedno i osjetljiviji na zarezno djelovanje gube kod dinamički opterećenih zavarenih konstrukcija svoja dobra mehanička svojstva (slika10).



Slika 10. Utjecaj materijala na dinamičku izdržljivost [10]

Upotreba čelika povišene čvrstoće podrazumijeva i povećanje razine napreznja uslijed čega će, kod kritičnih zavarenih konstrukcijskih detalja doći do skraćenja zamornog vijeka. Detalji

koji bi, da su izrađeni iz običnog brodograđevnog čelika, zadovoljili sa stanovišta dinamičke čvrstoće, ako se izrade iz čelika povišene čvrstoće, mogu dovesti do problema sa zamorom. Obradom spojeva nakon zavarivanja može se produljiti trajanje faze početka pukotine kod takvih spojeva, a time i osigurati nešto povoljnog učinka porasta granice tečenja na dinamičku čvrstoću.

### 2.3.5. *Korozija*

Korozija je nenamjerno razaranje konstrukcijskih materijala uzrokovano fizikalnim, fizikalno kemijskim i biološkim agensima. Korodiranje predstavlja kemijsku reakciju između površine metala i njene okoline. Elektroni napuštaju atome metala, a primaju ih otopljene molekule kisika u svodi, te u manjoj mjeri, ioni vodika (koji imaju nisku koncentraciju u vodi).

Korozija i morsko okruženje nepovoljno djeluju na dinamičku izdržljivost i ubrzavaju rast pukotine. Nepovoljan učinak korozije na zamorni vijek ogleda se u utjecaju na obje glavne faze u razvoju pukotine. Izuzetak su jedino materijali dobre otpornosti na koroziju, poput nekih legura titana, kod kojih korozija ubrzava rast pukotine, dok je utjecaj na stvaranje pukotine zanemariv [14]. Začetku zamornih pukotina doprinosi sam mehanizam korodiranja koji uzrokuje oštećenje površine, tzv. korozivne jame. Takva oštećenja površine uzrokuju značajne koncentracije naprezanja i stoga dovode do ranijeg oblikovanja zamorne pukotine. Osim toga, budući da korozivna okolina dramatično snižava granicu zamora, pukotine sada mogu nastajati i pri značajno nižim razinama raspona naprezanja.

Pravilno nanošenje zaštite od korozije jedno je od presudnih faktora koji utječu na vijek trajanja konstrukcije. Kako se metalne konstrukcije uglavnom izvode iz konstrukcijskih čelika podložnih koroziji, zaštititi od korozije potrebno je posvetiti posebnu pažnju. Prilikom konstruiranja konstrukcije potrebno je definirati i način zaštite od korozije. Na nepovoljne utjecaje korozije može se djelovati već u fazi projektiranja. Nagnuti elementi konstrukcije i otvori za pražnjenje trebaju omogućiti učinkovito uklanjanje tekućine iz tankova. Smanjivanjem horizontalnih površina i minimiziranjem deformacija na površinama koje se ne mogu izbjeći, treba onemogućiti zadržavanje tekućine [16].

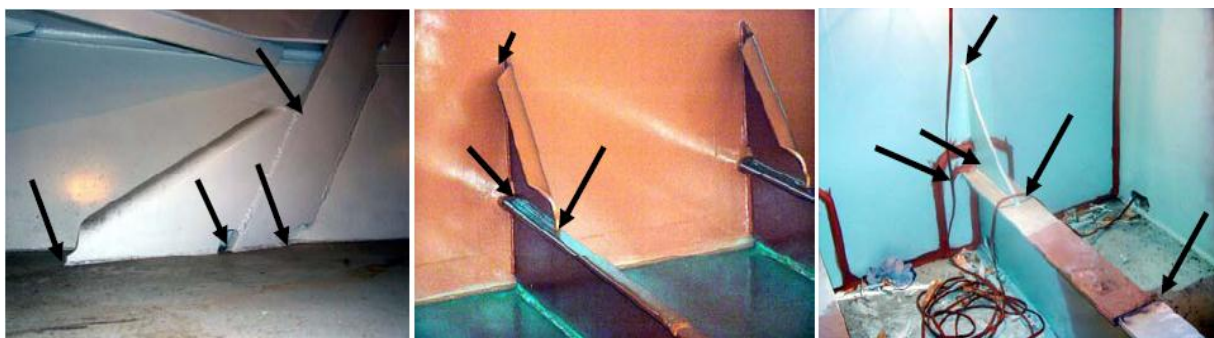
Dva su osnovna sustava zaštite od korozije. Prvi čine zaštitni premazi koji fizički odvajaju površinu čelika od kisika i elektrolita, sprečavajući tako proces korozije. Njihova



uspješnost ovisit će o pripremi površine koja treba biti dobro ispolirana kako ne bi došlo do preranog pucanja premaza uslijed koncentracije naprezanja i stvaranja pukotina. Drugi sustav predstavlja katodna zaštita koja se obično ugrađuje u teretne i balastne tankove radi zaštite izloženog čelika. Djelovanje anoda ogleda se u čišćenju i polariziranju čeličnih površina te polaganju zaštitnog sloja vapnenca. Potrebno je osigurati dostatan električni potencijal kako bi se ravnomjerno zaštitio cijeli tank [2].

## 2.4. Kritični detalji brodskih konstrukcija

Akumuliranjem plastičnih deformacija uslijed djelovanja promjenjivog opterećenja pukotine se u brodskim konstrukcijama s vremenom povećavaju, te kada neki detalj konstrukcije dovoljno oslabi može doći do loma. Nastanak zamornih pukotina u najvećoj mjeri zavisi o stanju naprezanja koje prevladava na mjestima pogodnim za nastanak pukotina. Životni vijek broda u službi ovisi o mnogo utjecajnih faktora i svaka je brodska konstrukcija drugačije osjetljiva na pojavu zamornih oštećenja [17]. Na temelju dugogodišnjeg iskustva u projektiranju i praćenja popuštanja brodskih konstrukcija za koje se pretpostavlja da su posljedica zamora materijala, klasifikacijska društva su stvorila baze podataka iz kojih se mogu prepoznati mjesta osobito osjetljiva na zamorna oštećenja (slika 11).

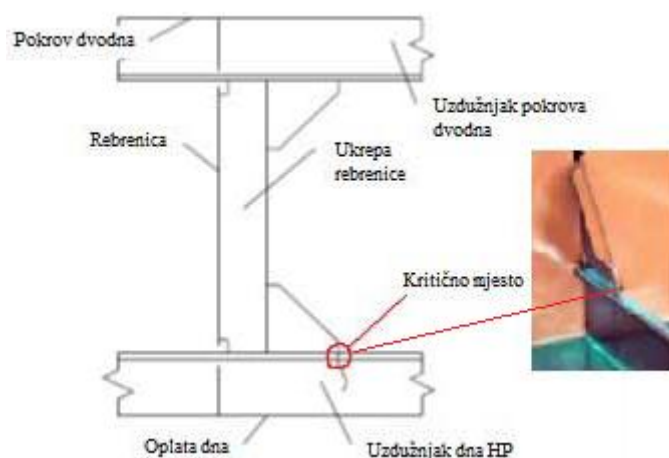


**Slika 11. Uobičajena mjesta zamora brodske konstrukcije - spojevi i vezne strukture [8]**

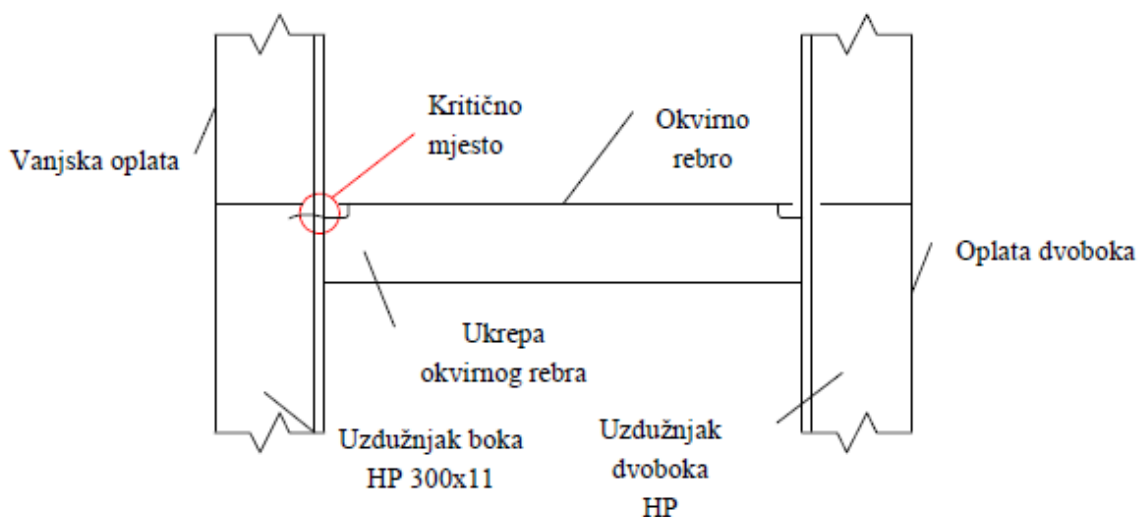
Oštećenja uslijed zamora su najčešće lokalna i pojavljuju se kod raznih detalja brodske konstrukcije ovisno o vrsti i namjeni broda, a najčešće nastaju na mjestima povećane koncentracije naprezanja i to [18]:

- duž izreza na spoju poprečnih okvira i uzdužnjaka,
- na krajevima koljena i drugim mjestima diskontinuiteta konstrukcije, posebno na uzdužnim elementima (slika 12),
- na spojevima s ukrepama i drugim sekundarnim elementima konstrukcije,

- na uzdužnjacima bokova broda izrađenim od čelika povišene čvrstoće (slika 13),
- presjek pokrova dvodna i nagnutog pokrova uzvojnog tanka,
- spojevi uzdužnjaka boka s okvirnim rebrima,
- spojevi uzdužnjaka boka s poprečnim pregradama,
- spojevi gornjih i donjih koljena rebara u skladištu s nagnutim limovima uzvojnog i krilnog tanka,
- spojevi donje kutije pregrade i naborane poprečne pregrade



Slika 12. Kritično mjesto pojave zamornog oštećenja - dvodno tankera [5]



Slika 13. Zamorno oštećenje uzdužnjaka tankera - bok broda [5]



### 2.4.1. Tankeri

Prijevoz tekućeg tereta morem na Sredozemlju postoji još od trećeg stoljeća prije nove ere, kada su se tekućine prevozile u amforama. Tekući tereti danas se prevoze posebno građenim brodovima - tankerima.

Tanker je brod za prijevoz tekućih tereta kojemu je čitav prostor za teret podijeljen uzdužnim i poprečnim pregradama na nepropusne odjeljke, koji se nazivaju tankovima [19]. Za ukrcavanje i iskrcavanje tekućeg tereta iz pojedinih tankova tankeri imaju poseban sustav cjevovoda i pumpnih uređaja. Prvi tankeri su se pojavili krajem 19. stoljeća i prevozili su naftu iz Meksičkog zaljeva za Englesku. Otada pa do danas, tankeri su prisutni na svim morima svijeta. Tankere možemo podijeliti po veličini i po vrsti tereta koji prevoze.

Paralelno s razvojem tankera nastoji se usavršiti i konstrukcija trupa, u prvom redu da se osigura potrebna čvrstoća. Zbog relativno male visine trupa i kritičnih opterećenja, koja mogu nastati uslijed nepovoljno raspoređenih tereta, odnosno balasta, nastaju u pojedinim strukturnim elementima znatna naprezanja, pa pod određenim okolnostima brodski trup može napuknuti ili se čak prelomiti. Radi bolje uzdužne čvrstoće se već 1906. usvaja uzdužni sustav gradnje tankera [9]. Tankeru Paul Paix iz 1908. ugrađena su uzdužna rebra, na dnu, boku i palubi, te jaka poprečna okvirna rebra i koljena. Budući da su se naprezanja uzdužnih elemenata prenosila i na poprečne elemente, 1925. je uvedena konstrukcija bez koljena.

Gotovo istodobno pojavljuju se i drugi sustavi gradnje, npr. sustav iz 1925, s poprečnim rebrima. Konstrukcija trupa i dalje se mijenjala. Uvode se dvije uzdužne pregrade umjesto dotadašnjih ljetnih tankova (summer tanks), pronalaze se nove forme spajanja pojedinih elemenata, osobito poslije primjene varenja i gradnje supertankera.

U novije vrijeme prevladava uzdužni sustav gradnje (s uzdužnim rebrima), iako je dosta čest i kombinirani sustav, tj. sustav s uzdužnim rebrima na dnu i palubi, poprečnim rebrima na boku u vertikalnim ukrepama na pregradama. Naročita se pažnja obraća izboru materijala podesnog za zavarivanje, uklanjanje oštih prekida te položaju i sustavu gradnje uzdužnih pregrada. Cijeli prostor ispod palube tankera, od pramčanog do strojarskog prostora, predviđen je za smještaj tereta i podijeljen je jednom ili s dvije uzdužne i nekoliko poprečnih pregrada u više tankova, tako da u poprečnom smjeru postoje lijevi i desni bočni i po jedan središnji tank. Tankovi nose brojeve od pramčanog prostora prema krmi. U poprečnom

smjeru, na pramcu, na krmi i po sredini broda nalaze se uski prazni prostori ili tzv. koferdami za odvajanje tankova tekućeg tereta od pramčanog i strojarskog prostora, dok središnji koferdam služi kao prostor za sisaljke u većini supertankera i mamut-tankera u poprečnom smjeru postoje dva bočna i dva središnja tanka, a između središnjih tankova u uzdužnici broda nalaze se uzdužni koferdam koji ujedno služi za prolaz cjevovoda za krcanje i iskrcavanje tereta.

#### 2.4.1.1. Podjela tankera po vrsti tereta koji prevoze

Tankeri, po pravilu imaju manje nadvođe od ostalih teretnih brodova, ali pregrade i stabilitet u slučaju prodora vode moraju udovoljavati naročitim zahtjevima, propisanim u Međunarodnoj konvenciji o teretnim linijama 1966, i u Međunarodnoj konvenciji za zaštitu ljudskog života na moru 1974. Tankeri se grade za prijevoz određene vrste tereta, najčešće sirove nafte ili njezinih derivata. Postoje i tankeri za druge vrste tekućih tereta, koji ponekad iziskuju posebnu konstrukciju i opremu. Međutim, tipičnim tankerom smatra se onaj što prevozi sirovu naftu, koji i po tonaži i po broju brodova nadmašuje sve ostale vrste tankera.

Prema vrsti tekućeg tereta koji prevoze mogu se podijeliti na:

- tankere za prijevoz sirove nafte
- tankere za prijevoz naftnih derivata
- tankere za prijevoz ukapljenog prirodnog plina
- tankere za prijevoz raznih kemikalija
- tankere za prijevoz pitke vode
- tankere za prijevoz posebnih vrsta tereta

#### 2.4.1.2. Podjela tankera po veličini

Tankeri za prijevoz tekućina po njihovoj veličini mogu se podijeliti u 6 kategorija:

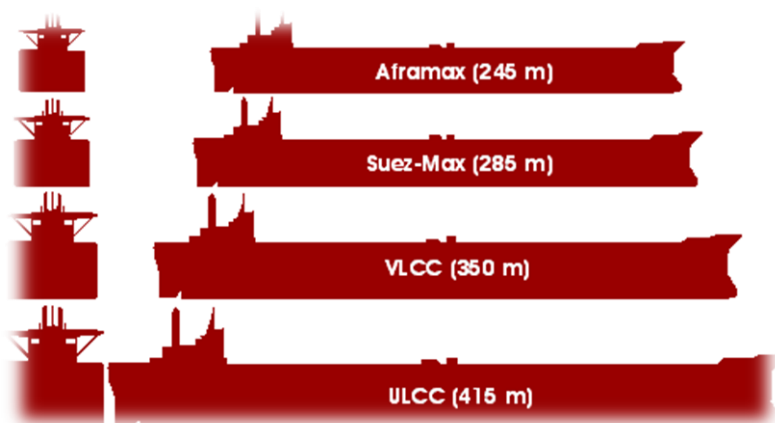
1. 10,000 - 60,000 dwt (do 200 m) - manji tanker koji se najčešće upotrebljava za prijevoz derivatna,
2. 60,000 - 80,000 dwt – Panamax,
3. 80,000 - 120,000 dwt - Aframax (do 245 m),
4. 120,000 - 200,000 dwt - Suezmax (do 350 m),
5. 200,000 - 315,000 dwt - VLCC (do 350 m),

---

6. 320,000 - 550,000 dwt - ULCC (do 450m).

VLCC (eng. Very Large Crude Carrier), supertankeri od 150,000 and 320,000 t ukupne nosivosti.

ULCC (eng. Ultra Large Crude Carrier), veliki supertankeri od 320,000 and 550,000 t ukupne nosivosti.



**Slika 14. Pregled veličina tankera**

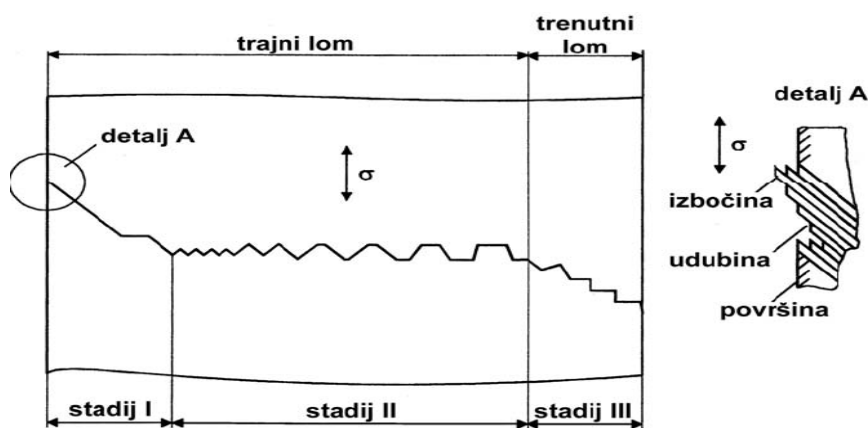
### 3. ZAMOR MATERIJALA

Konstrukcije i strojni dijelovi prilikom eksploatacije često nisu napregnuti statičkim naprežanjem već promjenjivim dinamičkim naprežanjem. Unatoč činjenici da je često iznos takvog naprežanja niži od granice tečenja, nakon nekog vremena može doći do loma materijala. Opće prihvaćena definicija zamora govori o procesu akumuliranja oštećenja, ciklus po ciklus, u materijalu koji uslijed izloženosti opterećenju doživljava promjenljiva (vlačna) naprežanja niža od granice tečenja. Do loma dolazi nakon određenog broja promjena opterećenja, kad akumulirano oštećenje dosegne kritičnu razinu, odnosno kada preostali dio poprečnog presjeka više ne može podnijeti opterećenje [1].

#### 3.1. Pukotine

Klasični pristup nauke o čvrstoći uzima u obzir činjenicu da naprežanja u blizini provrta, utora i sličnih geometrijskih diskontinuiteta mogu prijeći granicu tečenja, ali se pretpostavlja da će se materijal jednostavno plastično deformirati te da će nastati preraspodjela koncentriranih naprežanja. To često nije točno, jer kod mnogih materijala ne dolazi do preraspodjele naprežanja. Kad se oko pukotina u takvom materijalu pojave velike koncentracije naprežanja, nastaje nestabilno širenje pukotine koje može uzrokovati lom i kod veličina naprežanja mnogo manjih od granice tečenja čak i kod duktilnih materijala niske čvrstoće [4]. Proces zamora se sastoji od tri faze (slika 15):

- iniciranje pukotine,
- propagacija pukotine do kritične veličine,
- lom (preostalog dijela poprečnog presjeka).



Slika 15. Shematski prikaz nastanka zamornog sloma [1]

Zamor nastaje kao rezultat plastične deformacije i u razdoblju inicijacije i u razdoblju propagacije pukotine. Sve do završnog loma zamorno širenje pukotine određeni je oblik duktilnog loma materijala, iako je ta duktilnost, potpuno lokalne prirode, ograničena samo na procesnu zonu [4]. Fizikalno razumijevanje mehanizama koji se odvijaju unutar tih faza nužno je kako bi se mogli kvalitetno razmotriti različiti tehnički uvjeti koji utječu na zamorni vijek, poput kvalitete površine materijala, zaostalih naprezanja, okolišnih uvjeta i slično [2].

### 3.1.1. Iniciranje pukotine

U fizikalnom smislu pod pojmom pukotine podrazumijeva se odsutnost veza između dva susjedna sloja atoma u materijalu. Čvrstoća materijala posljedica je djelovanja atomskih sila koje sprečavaju odvajanje susjednih atoma. Djelovanjem naprezanja može doći do razaranja međuatomskih veza i do stvaranja nove slobodne površine. Izjednačavanjem energije potrebne za nastanak nove slobodne površine i rada međuatomskih sila pri nastanku pukotine dobiva se izraz za teorijsku čvrstoću materijala. Maksimalno naprezanje koje idealna kristalna rešetka može podnijeti bez prekidanja atomskih veza određena je izrazom [1]:

$$\sigma_{teo} = 2 \cdot \sqrt{E \cdot \frac{\gamma}{d}} \quad (2)$$

gdje je

$E$  - modul elastičnosti materijala,  $N/mm^2$

$\gamma$  - energija potrebna za stvaranje nove površine unutar materijala,  $J/mm^2$

$d$  - razmak između kristalnih ravnina

**Tablica 2. Teorijska čvrstoća**

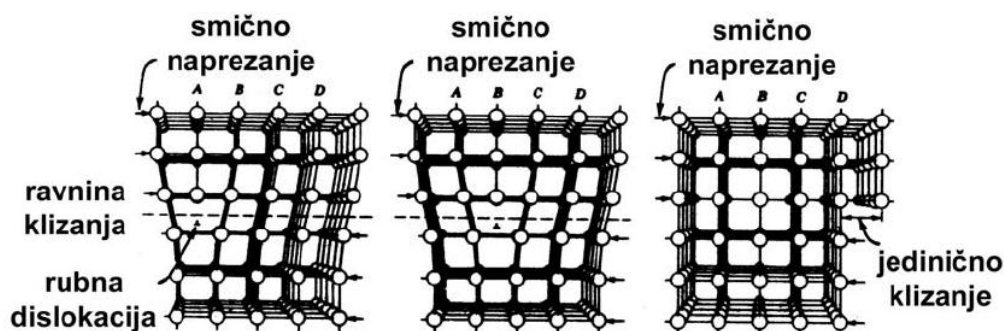
| Materijal   | $E, [N/mm^2]$ | $\gamma, [J/m^2]$ | $\sigma_{teo}, [N/mm^2]$ |
|-------------|---------------|-------------------|--------------------------|
| Cu          | 192 000       | 1,65              | 39 000                   |
| $\alpha$ Fe | 260 000       | 2,00              | 46 000                   |

Iz pokusa na metalima, a i inženjerske prakse znamo da su stvarne vrijednosti čvrstoće 1 - 2 reda veličine niže od navedene teorijske vrijednost [20]. Objašnjenje tolike razlike između stvarne i teorijske čvrstoće leži u činjenici da kod realnih materijala atomska rešetka nije idealna, uslijed čega je maksimalno lokalno naprezanje u materijalu znatno veće od srednje

vrijednosti naprezanja po poprečnom presjeku. Do tako velikih koncentracija naprezanja dolazi u neposrednoj blizini makroskopskih i mikroskopskih oštećenja materijala. Mikroskopska oštećenja na razini atomske rešetke su:

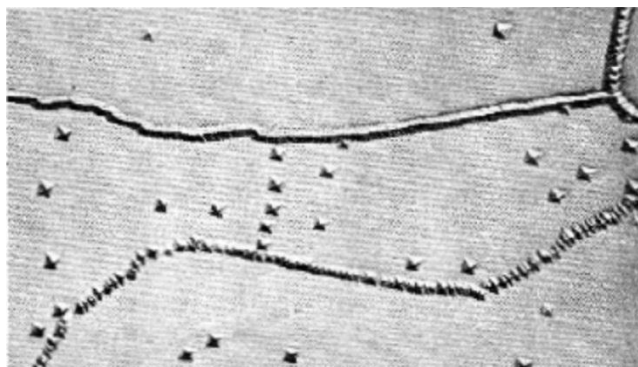
- dislokacija,
- atomska šupljina,
- prisutnost stranog atoma u rešetki,
- atom pomaknut sa svog smjesta.

Mehanizam gibanja dislokacija objašnjava razliku između teorijske i stvarne tangencijalne čvrstoće metala. Koncept dislokacija pokazuje da je naprezanje potrebno za gibanje dislokacija unutar kristalne rešetke manje od teorijskog tangencijalnog naprezanja te da gibanje dislokacija uzrokuje pojavu stuba ili kliznih traka na slobodnim vanjskim površinama (slika 16).



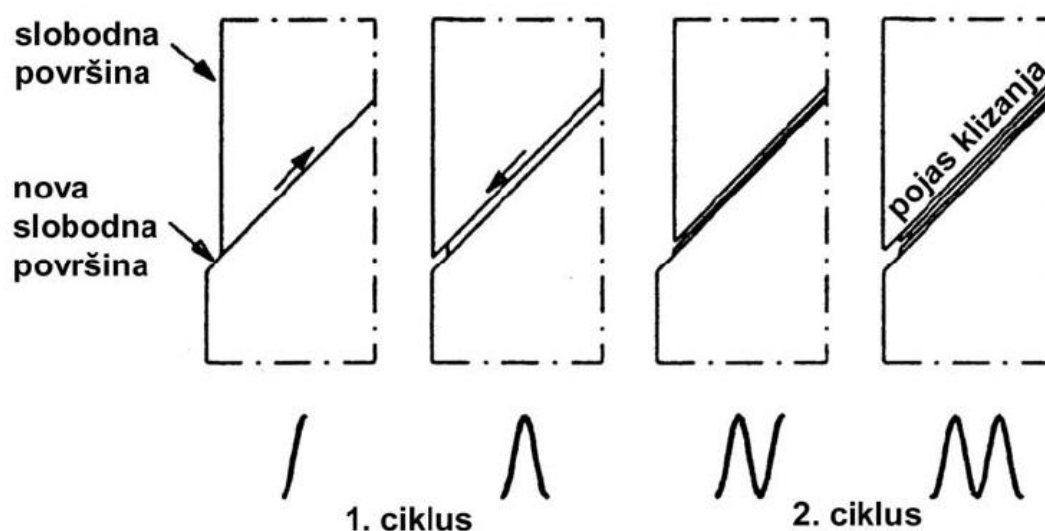
Slika 16. Gibanje rubne dislokacije [20]

Pri smičnom opterećenju, dislokacija se kreće u smjeru djelovanja sile, pri čemu se atomske veze ispred dislokacije prekidaju i ponovno uspostavljaju nakon njenog prolaska. Kako se nakon prolaska dislokacije ponovno uspostavljaju atomske veze, rezultirajuća konfiguracija kristalne rešetke je stabilna, što znači da nakupljena neelastična deformacija klizanja ostaje u materijalu i nakon rasterećenja.



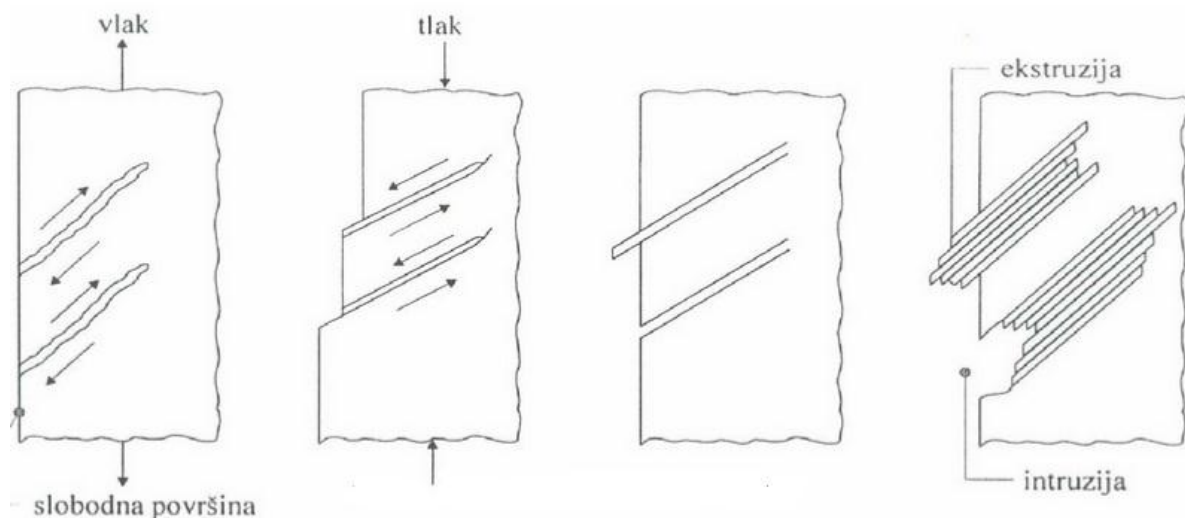
Slika 17. Mikroskopski izgled dislokacija

Osim toga, ne mijenja se niti modul elastičnosti materijala (koji ovisi o broju i vrsti atomskih veza), tako da je nagib krivulje naprezanje-deformacija pri rasterećenju jednak onome pri prvotnom opterećenju iz čega se može zaključiti da je riječ o plastičnom tečenju. Takvo ciklusno plastično deformiranje uslijed kretanja dislokacija dovodi do nastanka zamorne pukotine. Ono se odvija duž podložnih kristalografskih kliznih ravnina i nije potpuno povratan proces. U prvom se ciklusu stvara korak klizanja na površini materijala, pri čemu se obruč novog materijala izlaže okolišnim uvjetima. Budući da uslijed plastičnog deformiranja dolazi do očvršćivanja materijala (što znači da je daljnje deformiranje moguće samo uz porast naprezanja), u suprotnom smjeru djeluje veće smično naprezanje. Osim toga, stvaranje veoma tankog sloja oksida koji jako prijanja na novostvorenu slobodnu površinu materijala i koji se ne može lako ukloniti, uzrokuje da se povratno klizanje odvija na susjednoj paralelnoj ravni klizanja (slika 18). Ponavljanje ovih ciklusa dovodi do širenja trajnog pojasa klizanja koji se razvija u ekstruzije ili intruzije na slobodnoj površini (slika 19).



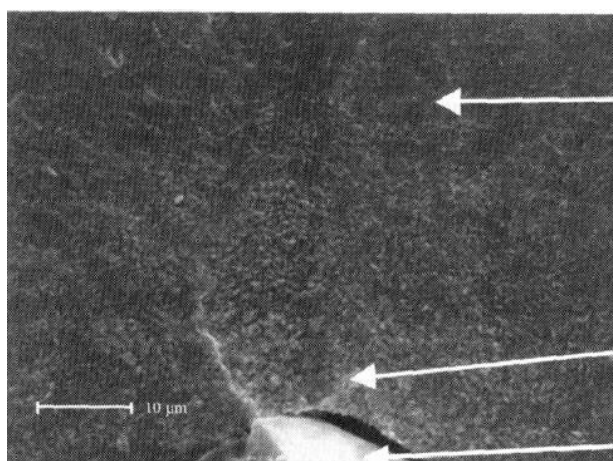
Slika 18. Razvoj pojasa klizanja [14]

Pukotine kod zamora mogu se izazvati na više načina, no važna je činjenica da se one uvijek počinju formirati na slobodnoj površini, stoga je vrlo važno stanje površine kod ispitivanja otpornosti na zamor. Nesavršenost procesa izrade i obrade materijala je glavni uzrok površinskih oštećenja. Osjetljivost na površinska oštećenja raste s vlačnom čvrstoćom materijala, općenito vrijedi što je materijal veće čvrstoće to je veći utjecaj stanja površine na zamor. Inicijalna pukotina duljine je kristalnog zrna (oko 0,05 mm), a proces začeca pukotine započinje cikličkim gomilanjem plastičnih deformacija na mjestima mikro-koncentracije naprezanja.



**Slika 19. Stvaranje intruzija i ekstruzija na slobodnoj površini**

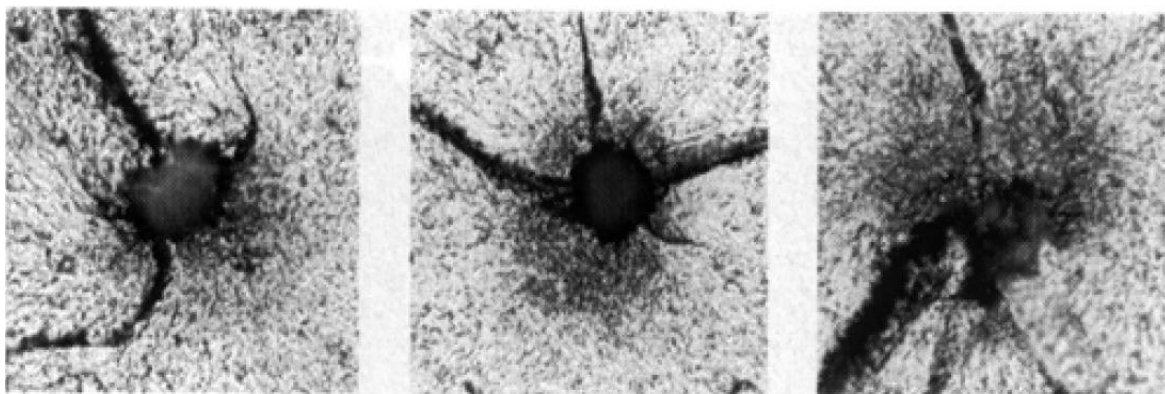
Kada je izvor pukotine pod površinom, onda je to isključivo na mjestima kaverni ili uključina, slika 20. Kod sivog lijeva začeca pukotine je redovito na kraju grafitnog listića, koji je dio njegove strukture i predstavlja konzentator naprežanja.



**Slika 20. Tvrda uključina kao izvor ispod površinskog začeca pukotine Cr-Mo čelika**

Također izvor pukotine može biti i mekana intergranularna zona koja često označuje tzv. trostruku točku (tri smjera pucanja) u kojoj se iniciraju tri mikropukotine - svaka u svom smjeru, slika 21.





**Slika 21. Tri primjera trostrukog začeca mikropukotina na jednom izvoru kod Cr-Mo čelika [20]**

Inicijalna pukotina nastala na površini širi se kod materijala sa kristalnom strukturom pod kutom od  $45^\circ$  u odnosu na normalno naprezanje tj. u smjeru maksimalnog smičnog naprezanja.

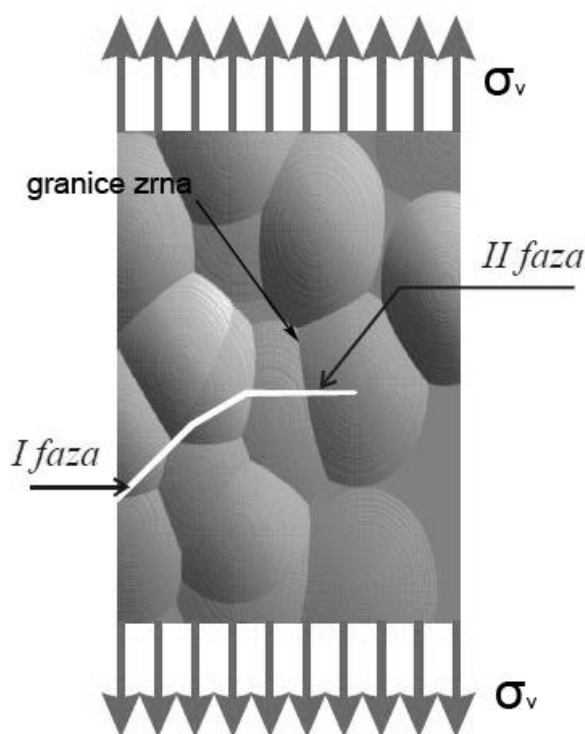
### **3.1.2. Propagacija pukotine do kritične veličine**

Ne postoji jasna granica između faze početka pukotine i faze njenog rasta. Jedni navode kao graničnu točku duljinu same pukotine dok drugi kažu da razdoblje nastanka pukotine završava onda kada rast mikropukotine više ne ovisi o stanju slobodne površine [14]. Propagaciju inicirane pukotine možemo podijeliti u dvije sljedeće faze [4] :

I Faza: Inicirana pukotina na površinskom kliznom pojasu u jednom kristalu širi se u smjeru primarnih ploha klizanja, odnosno u smjeru maksimalnog smičnog naprezanja. Zbog doprinosa mikropukotine nehomogenoj raspodjeli naprezanja na mikroskopskoj razini i koncentracije naprezanja na njenom vršku, može doći do aktiviranja više od jednog kliznog sustava. Štoviše, urastanjem pukotine u materijal za nekoliko veličina zrna, uslijed prisutnosti okolnih zrna rastu ograničenja klizanju. Sve je teže održavati napredovanje pukotine samo u smjeru početnog kliznog pojasa i ona odstupa od tog smjera težeći rasti okomito na smjer maksimalnog vlačnog naprezanja što predstavlja II Fazu propagacije pukotine. Prva je faza često izražena kod cikličkih torzijskih opterećenja.

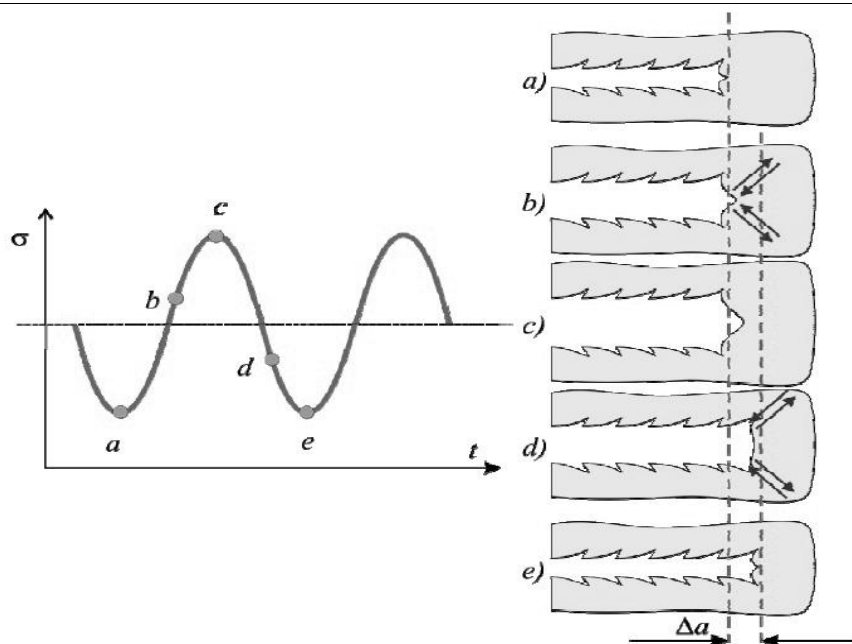
II Faza: U drugoj fazi smjer propagacije pukotine okomit je na iznos maksimalnog vlačnog naprezanja, a kada će nastupiti druga faza ovisi o veličini tog naprezanja. Kod vrlo velikih vlačnih naprezanja (niskociklički zamor) faza iniciranja pukotine je neprimjetna, tj.

druga faza zauzima gotovo cijelo područje lomne površine. Područje visokocikličkog i niskocikličkog zamora vrlo je teško razgraničiti, a najčešće se u postupcima za ocjenu zamora brodskih konstrukcija pretpostavlja granica  $\sim 10^4$  do  $\sim 10^5$  ciklusa do loma [2]



Slika 22. Faze rasta pukotine pri cikličkom opterećenju [4]

Druga faza rasta pukotine može se analizirati pri cikličkom opterećenju na temelju jednog ciklusa. Jedna od najvažnijih značajki druge faze jest da pukotina napreduje konačnim priraštajima, od kojih svakom priraštaju odgovara jedan ciklus opterećenja. Za vrijeme povećanja opterećenja otupljuje vršak pukotine uslijed njenog otvaranja, a istodobno se širi zona plastične deformacije oko njenog vrška. Prilikom rasterećenja dolazi do ponovnog zaoštavanja vrška pukotine, te se pukotina neće potpuno zatvoriti i na površinama vrška pukotine stvorenim u određenom ciklusu ostaju grebeni mikroplastičnih deformacija koje se nazivaju brazdama. Svakoj brazdi odgovara jedan ciklus opterećenja, tako da nam brojenje brazdi omogućuje brojenje mikronapredovanja fronte pukotine, a još je važnije i praćenje toka širenja pukotine (fosilizacija procesa loma). Mehanizam širenja pukotine u drugoj fazi prikazan je pojednostavljeno na slici 23.



**Slika 23. Produljenje pukotine u jednom ciklusu opterećenja [4]**

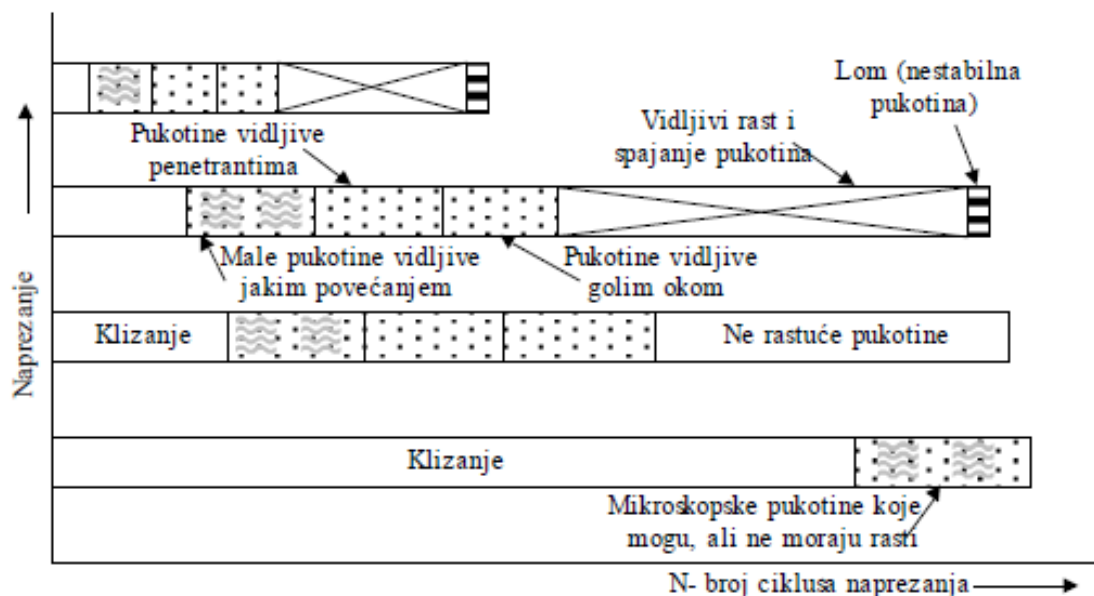
Izmjenično otupljivanje i ponovno zaoštavanje vrška pukotine osnovna je značajka druge faze propagacije. Kod intenzivnih i niskofrekventnih cikličkih opterećenja brazde se vide golim okom (slika 24), dok se prilikom naprezanja male amplitude ili kod visokofrekventnih opterećenja mogu vidjeti tek elektronskim mikroskopom.



**Slika 24. Brazde stvorene kod zamornog loma**

Ne mora svaka zamorna pukotina narasti do kritične duljine kod koje bi došlo do konačnog loma (slika 25). Propagacija pukotine može prestati zbog promjene polja naprezanja u vršku pukotine, kada raspon naprezanja pada ispod granice nužne za odvijanje ciklusnog klizanja. Takve pukotine nastaju obično kod visokih koncentracija naprezanja pri

niskim rasponima naprežanjima. Udaljavanjem pukotine od površine materijala dolazi do porasta ograničenja ciklusnom klizanju i daljnji rast pukotine prestaje. Osim njih, postoje i mikropukotine koje ne uspiju prodrijeti u susjedna zrna već se zaustave na njihovoj granici. Takve pukotine se nazivaju mikrostrukturnim kratkim pukotinama.



Slika 25. Shematski prikaz procesa napredovanja zamornih pukotina [22]

Brzina napredovanja pukotine ovisit će o otpornosti materijala na rast pukotine, što opisuje Paris-Erdoganov zakon rasta pukotine [23]:

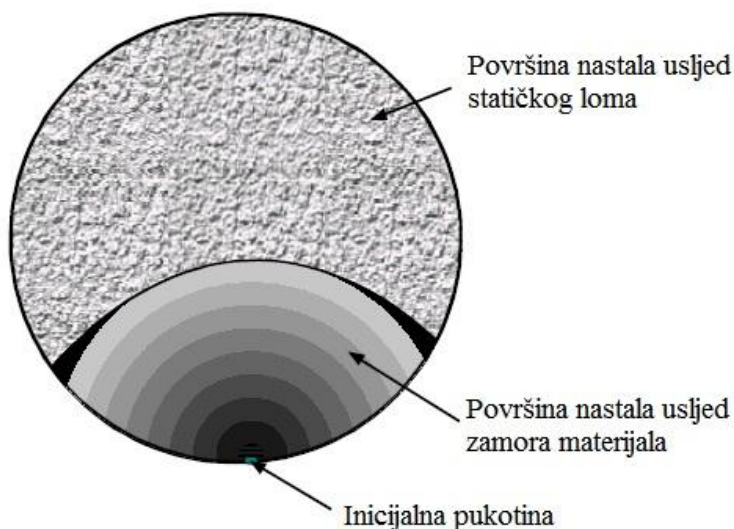
$$\frac{dA}{dN} = C \cdot (\Delta K^m) \quad (3)$$

gdje su  $C$  i  $m$  konstante materijala, dok je  $\Delta K$  faktor intenzivnosti naprežanja ovisan o primijenjenom opterećenju te duljini i obliku pukotine.

### 3.1.3. Lom preostalog dijela poprečnog presjeka

Kada se površina poprečnog presjeka smanji toliko da nosivi dio presjeka više ne može podnijeti nametnuto opterećenje, dolazi do konačnog loma. Ono se može javiti preko tri osnovna mehanizma: krtog loma, žilavog loma i plastičnog popuštanja, ovisno o žilavosti materijala, opterećenju, temperaturi, itd.

Prijelomna površina sastoji se od dva karakteristična dijela (slika 26). Zaglađenog svijetlog dijela s brazdama napredovanja pukotine, koje podsjećaju na godove drveta. Taj dio prijelomne površine nastajao je dulje vremena pa se i naziva područjem trajnog loma.



**Slika 26. Površina loma uslijed zamora materijala**

Drugi dio površine je područje trenutnog loma koji je hrapav, zagasit i zrnat, a nastao je u trenutku kada je nametnuto naprezanje, zbog smanjenja nosive plohe, naraslo na iznos jednak vlačnoj čvrstoći materijala. Odnos površina trajnog i trenutnog loma te njihov razmještaj na prijelomnoj površini ovisi o vrsti i intenzitetu dinamičkog naprezanja te intenzitetu koncentracije naprezanja.

Relativno trajanje tri faze napredovanja pukotine ovisi o mnogo varijabli kao što su svojstva materijala, geometrija pukotine, krutost konstrukcije, amplituda naprezanja, održavanje konstrukcije itd. Cilj analize zamora je ostvarenje takve konstrukcije za koju će vrijeme kompletiranja opisane tri faze rasta pukotine uvijek biti veće od predviđenog vijeka trajanja konstrukcije.

### **3.2. Krhki lom**

Lom koji se odvija pri malim deformacijama karakterizira se nagomilavanjem mikropora i mikropukotina koje se nagomilavaju u materijalu tokom vremena, čime se znatno smanjuje njegova čvrstoća. Krhki lom se događa kod vrijednosti naprezanja ispod granice razvlačenja. U praksi se najčešće dešava kada je temperatura u eksploataciji zavarene konstrukcije niža od temperature prijelazne temperature (iz žilavog u krhko stanje), kod

djelovanja na primjer korozije uz naprezanje. Na prijelomnim površinama nema vidljive plastične deformacije, lom je obično ubrzan. Zbog toga analiza krhkog loma zahtjeva ispitivanje ponašanja tijela oslabljenog dovoljno velikim pukotinama, pogotovo kod materijala koji su krhki, jer kod takvih materijala i male pukotine naglo smanjuju čvrstoću.

Nastanku krhkog loma osobito pogoduju:

- velike brzine djelovanja opterećenja, čime se onemogućava razvoj plastične deformacije, za koju je potrebno određeno, konačno vrijeme,
- izražena koncentracija naprezanja na mjestima geometrijskih diskontinuiteta (prijelazna zaobljenja, otvori, zarezi, pukotine),
- uporaba konstrukcija od čelika na temperaturama nižim od temperature nulte duktilnosti (plastičnosti), kod kojih se neke vrste čelika ponašaju izrazito krhko.

### 3.2.1. *Krhki lom stakla*

Alan Arnold Griffith, 1920. Godine je eksperimentirao sa staklom, koje se lomi krhko, bez gotovo i najmanje deformacije i izvodi ovisnost između širenja pukotine i vanjskog opterećenja koristeći energijski koncept [4],

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad \text{RN} \quad (4)$$

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma}{(1-\nu^2)\pi a}} \quad \text{RD} \quad (5)$$

gdje je:  $\sigma_c$  - kritično vlačno naprezanje pri kojem se lom odvija bez dodatnog utroška energije,  $E$  - modul elastičnosti,  $\gamma$  - energija površinske napetosti (potrebna energija da se stvore dvije nove površine prijeloma),  $a$  – duljina pukotine,  $\nu$  - Poissonov koeficijent, RN - ravninsko stanje naprezanja i RD - ravninsko stanje deformacije. Griffith je pokazao da se porastom duljine pukotine kritično naprezanje smanjuje zbog čega nastaje naglo širenje pukotine. Također možemo uočiti da za određeni materijal vrijedi:

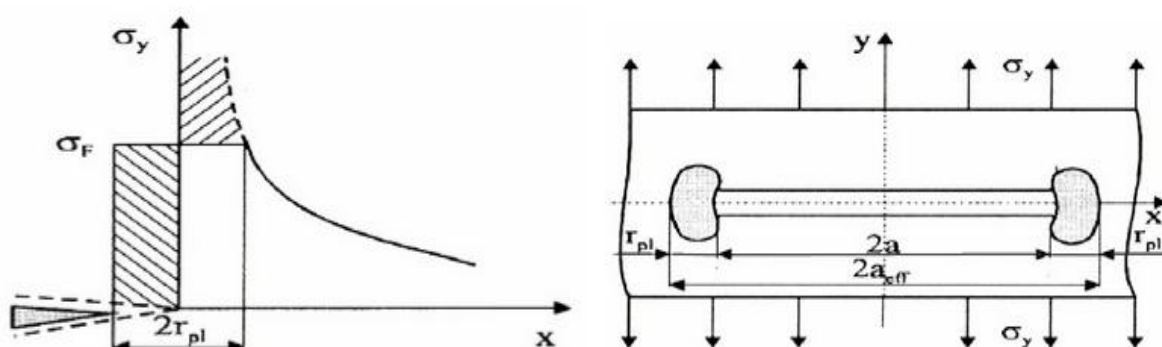
$$\sigma\sqrt{\pi a} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{(1-\nu^2)}} = \text{konst.}, \quad (6)$$

što se za krhke materijale kvalitativno slaže.

Zbog činjenice da je svoje tvrdnje Griffith eksperimentalno dokazao na staklu rezultati njegovih radova nisu izazvali šire zanimanje u razdoblju kada su objavljeni.

### 3.3. Irwinova modificirana teorija loma

Osnova Irwinova rada bila je modifikacija Griffithove teorije. On je utvrdio da važnu ulogu pri razvoju pukotina ima i plastična deformacija, jer zbog koncentracije naprezanja oko vrška pukotine lokalno naprezanje postaje veće od granice tečenja.



Slika 27. Irvinov model pukotine [24]

Irwin u svojim radovima već rabi pojmove dinamika loma i mehanika loma, a točnije se definiraju i parametri koji će kasnije biti osnova eksperimentalnih istraživanja u mehanici loma. Pokazuje da je sila razvoja pukotine  $G$  u neposrednoj vezi s faktorom intenziteta naprezanja  $K$ , prema jednadžbama:

$$G = \frac{K^2}{E} \quad \text{RN} \quad (7)$$

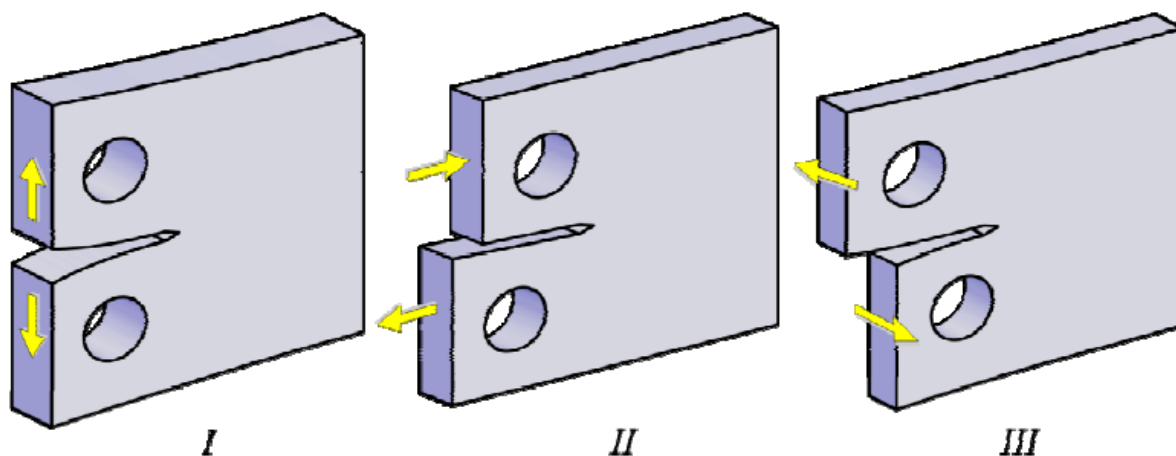
$$G = \frac{K^2}{E} (1 - \nu^2) \quad \text{RD} \quad (8)$$

pri čemu je:

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (9)$$

Pukotine bitno utječu na raspodjelu naprezanja u elastičnom tijelu. Posebno je važno odrediti stanje naprezanja oko vrška pukotine, budući da se tamo pojavljuju velike deformacije, iznad

granice elastičnosti. Ovisno o vrsti naprezanja razlikuju se tri načina otvaranja pukotine kod ravninskih problema. To su odcjepni lom, smični lom i vijčani lom (slika 28).



Slika 28. Načini otvaranja pukotine pri lomu [4]

- I - odcjepni način odvija se na način da se površine loma odvajaju jedna od druge. Susreće se kod strojnih dijelova s vanjskim i unutarnjim pukotinama, opterećenih vlačnim opterećenjem i na savijanje, te kod konstrukcija podvrgnutih unutrašnjim tlakovima,
- II - smični način odvija se na način da površine loma klize jedna po drugoj,
- III - vijčani način odvija se na način da površine loma klize jedna po drugoj,

Najznačajniji je slučaj širenja pukotine odcjepnim načinom (I). Za odcjepni način otvaranja pukotine koeficijent intenzivnosti naprezanja za duktilne materijale oko vrška pukotine je:

$$K_{IC} = \sigma \sqrt{\pi a} = \sqrt{\frac{2E (\gamma + \gamma_p)}{(1 - \nu^2)}} \quad (10)$$

gdje je:  $\gamma_p$  rad plastične deformacije potreban za formiranje jedinične površine pukotine. Kritičnu vrijednost koeficijenta intenzivnosti naprezanja  $K_{IC}$  nazivamo pukotinskom žilavošću. Što je kritična vrijednost koeficijenta intenzivnosti naprezanja  $K_{IC}$  veća, bit će veća i otpornost materijala na širenje pukotine.



#### 4. ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA MATERIJALA

Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala bitno je zbog činjenice da se na osnovi njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i uređaja. S pomoću mehaničkih svojstava može se objektivno ocijeniti kvaliteta materijala u kontroli poluproizvoda i proizvoda. Mehanička svojstva materijala osnovni su kriterij za ocjenu uporabnih karakteristika pojedinih materijala. Kao i sva ostala svojstva mehanička svojstva materijala su posljedica strukturnog stanja materijal, koje se dobiva obradom materijala određenog sastava određenim tehnološkim postupkom. Na osnovu nekih mehaničkih i tehnoloških svojstava materijala utvrđuju se tehnološki parametri u proizvodnji.

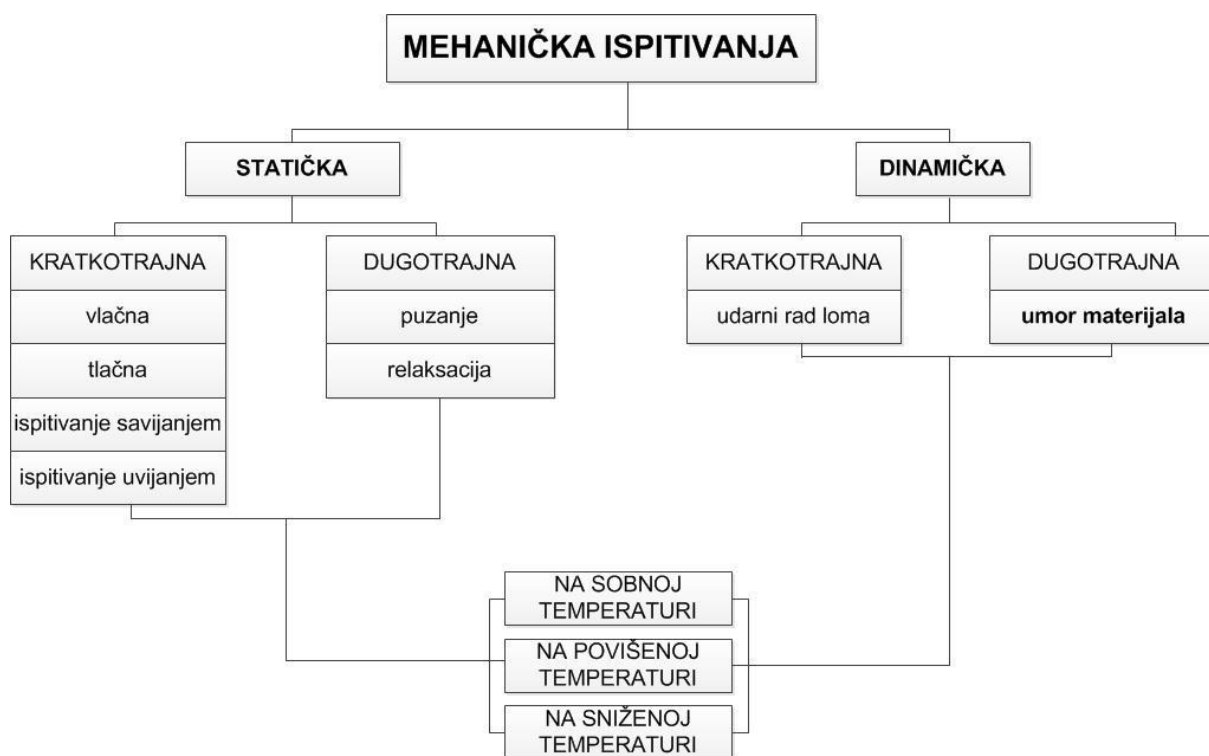
Prema mehaničkim svojstvima materijale možemo podijeliti na plastične, na lomljive / tvrde / krte, te na žilave. Iako mnogi materijali sadrže na neki način sva tri svojstva, ovisno o tome koje ponašanje prevladava, svrstavamo ih u jednu od navedenih kategorija [1].

Najvažniji pojmovi koji se koriste kod ispitivanja mehaničkih svojstava materijala su [25]:

- uzorak - proizvod odabran iz određene ispitne količine ili ispitne skupine, sa svrhom, da se iz njega izrade epruvete za ispitivanje,
- ispitna količina/ispitna skupina - dio isporučene količine na koja se odnose rezultati ispitivanja. Pojam se može primijeniti npr. na specifični broj proizvoda istih dimenzija, proizvoda različitih dimenzija proizvedenih od jedne taline, ili valjane duljine materijala,
- epruveta za ispitivanje - izrađuje se iz komada koji je određen za ispitivanje, ima normirane dimenzije i podliježe se normiranom ispitivanju

Opća sistematizacija mehaničkih ispitivanja je (slika 29):

- a) prema načinu djelovanja opterećenja,
- b) prema brzini djelovanja opterećenja,
- c) prema temperaturi ispitivanja,
- d) prema trajanju djelovanja opterećenja.



**Slika 29. Sistematizacija mehaničkih ispitivanja**

Svi proizvodi podliježu ispitivanju rastezanjem, kod limova, toplo valjanih traka i širokih traka širine  $\geq 600$  mm epruvete se uzimaju poprečno na smjer valjanja. Za sve ostale vrste proizvoda epruvete se mogu uzimati poprečno ili paralelno sa smjerom valjanja. Broj epruveta određuje se na slijedeći način [25]:

- limovi i ploče: jedna epruveta s jednog kraja od svake valjane duljine. Ako je valjana duljina dulja od 7 m, uzima se po jedna epruveta s oba kraja,
- limovi odrezani od toplo valjanih širokih traka, koji se podvrgavaju pojedinačnoj toplinskoj obradi: po jedna epruveta od svakog vanjskog i unutarnjeg kraja koluta i od polovine trake,
- svi ostali proizvodi: jedna epruveta po ispitnoj skupini, koja ne smije biti teža od 15 t.

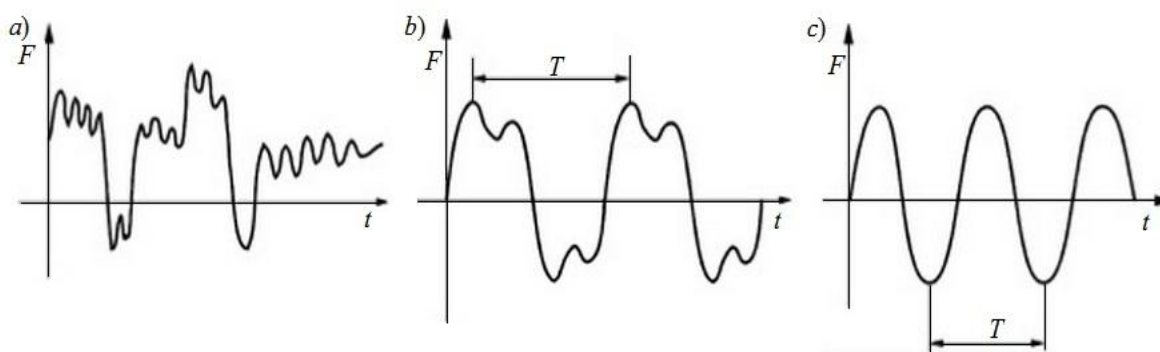
Uzorci za ispitivanje moraju biti odrezani na točno određenim mjestima te se mogu uzeti samo nakon završetka svih mehaničkih i/ili toplinskih obrada koje se primjenjuju na proizvod prije isporuke. Iznimno toplinska obrada (npr. žarenje za smanjenje unutarnjih naprezanja), može se zanemariti. Ako u izuzetnim slučajevima uzorci za ispitivanje ne mogu ostati pripojeni uz proizvod do kraja tehnološkog procesa proizvodnje, npr. ako se proizvodi obrađuju na završne dimenzije prije žarenja, onda oni moraju biti podvrgnuti istim

mehaničkim i toplinskim obradama kao i proizvod. Ako su uzorci uzeti iz materijala plinskim rezanjem ili odsijecanjem, potrebno je predvidjeti odgovarajući rub, koji se mora odstraniti prije završne obrade.

#### 4.1. Dinamička izdržljivost

Mehaničko svojstvo koje pokazuje otpornost materijala dinamičkom naprezanju a s time i pojavi umora materijala naziva se dinamička izdržljivost [1]. Dinamička izdržljivost je najveće dinamičko (promjenjivo) naprezanje koje ispitna epruveta izdrži bez pojave loma nakon praktički beskonačno mnogo ciklusa. Svrha ispitivanja dinamičke izdržljivosti je utvrđivanje ponašanja strojnog djela ili konstrukcije u uvjetima dugotrajnog djelovanja dinamičkog (promjenjivog) naprezanja [1].

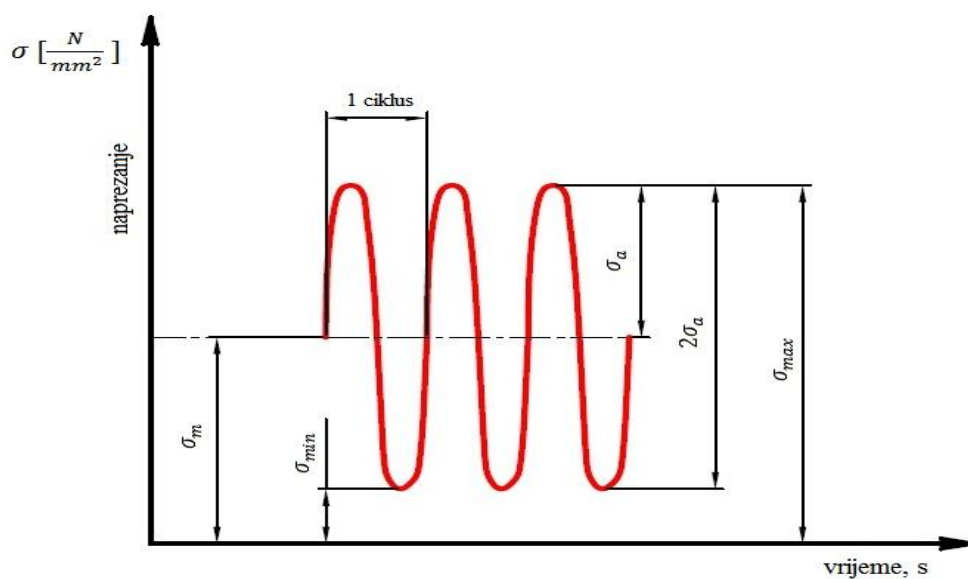
Dinamička opterećenja su ona opterećenja koja se tijekom vremena mijenjaju po veličini i/ili po smjeru. Promjene veličine opterećenja mogu biti stohastičke, periodičke, harmonične (slika 30.). Postoje također udarna dinamička opterećenja, pri kojima se veličina opterećenja mijenja skokovito u vrlo kratkom vremenskom intervalu, tako da imaju karakter kratkotrajnog impulsa.



**Slika 30. Vrste dinamičkih opterećenja, a) stohastičko, b) periodičko, c) harmonično [26]**

Pri proračunu strojnih dijelova periodička dinamička opterećenja najčešće se aproksimiraju s harmoničnim dinamičkim opterećenjem, a dodatni nepoželjni utjecaji zbog udarnih opterećenja uzimaju se u obzir faktorom sigurnosti [26].

## Definicija osnovnih pojmova:



Slika 31. Uz definiciju osnovnih pojmova [27]

gdje je:

| Simbol         | Opis                                      | Jedinica        |
|----------------|---|-----------------|
| $\sigma_{max}$ | Maksimalno naprezanje ciklusa             | $\text{N/mm}^2$ |
| $\sigma_{min}$ | Minimalno naprezanje ciklusa              | $\text{N/mm}^2$ |
| $\sigma_m$     | Srednje naprezanje ciklusa                | $\text{N/mm}^2$ |
| $\sigma_a$     | Amplituda ciklusa naprezanja              | $\text{N/mm}^2$ |
| $2\sigma_a$    | Raspon naprezanja                         | $\text{N/mm}^2$ |
| $r$            | Koeficijent asimetrije ciklusa naprezanja |                 |
| $N$            | Broj ciklusa                              |                 |

Pri harmoničnom naprezanju veličina naprezanja se mijenja u intervalu između najmanje i najveće vrijednosti, pri čemu su amplituda ciklusa naprezanja i srednje naprezanje određeni izrazom

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (11)$$

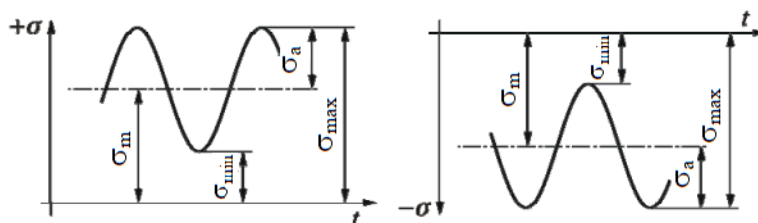
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (12)$$

Karakter dinamičkih opterećenja uvijek se određuje s obzirom na koeficijent asimetrije  $r$  ciklusa naprezanja, koji je definiran kao omjer minimalnog i maksimalnog naprezanja ciklusa određen je izrazom

$$r = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}, \quad -1 \leq r \leq 1 \quad (13)$$

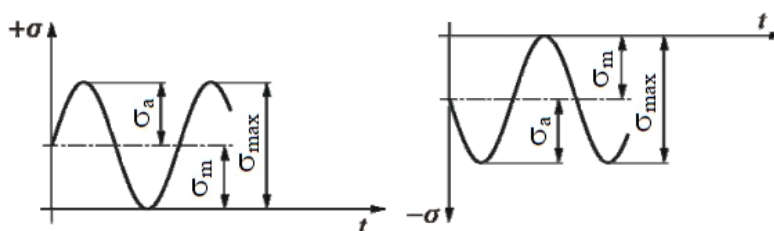
S obzirom na veličinu koeficijenta asimetrije ciklusa naprezanja možemo razlikovati sljedeća izmjenjiva naprezanja [10]:

- istosmjerno promjenjivo naprezanje s prednapreznjem ( $0 < r < 1$ )



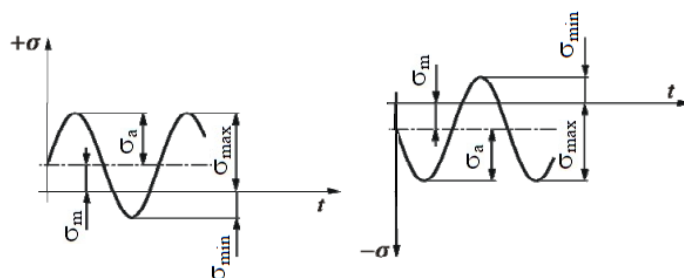
Slika 32. Istosmjerno promjenjivo naprezanje s prednapreznjem [10]

- čisto istosmjerno promjenjivo naprezanje ( $r = 0$ )



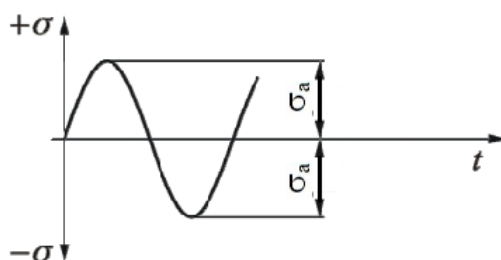
Slika 33. Čisto istosmjerno promjenjivo naprezanje [10]

- naizmjenično promjenjivo naprezanje s prednaprežanjem ( $-1 < r < 0$ )



**Slika 34. Naizmjenično promjenjivo naprezanje s prednaprežanjem [10]**

- čisto naizmjenično promjenjivo naprezanje ( $r = -1$ )



**Slika 35. Čisto naizmjenično promjenjivo naprezanje [10]**

Treba primijetiti da se s porastom koeficijenta asimetrije ciklusa (omjera minimalnog i maksimalnog naprezanja ciklusa) dinamičko opterećenje se sve više približava statičkom opterećenju ( $r = 1$ ).

Dinamička ispitivanja provode se na uređajima koji omogućuju promjenjivo (titrajno) opterećivanje epruvete ili strojnih dijelova a nazivaju se pulzatori ili umaralice. Umaralice rade hidraulički, servohidraulički ili na principu elektromagnetske rezonancije. S obzirom na frekvenciju promjenjivog (cikličkog, titrajnog) opterećenja možemo razlikovati:

- $f < 5 \text{ Hz} \rightarrow$  niskofrekventno ispitivanje
- $5 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz} \rightarrow$  srednjefrekventno ispitivanje
- $f > 30 \text{ Hz} \rightarrow$  visokofrekventno ispitivanje

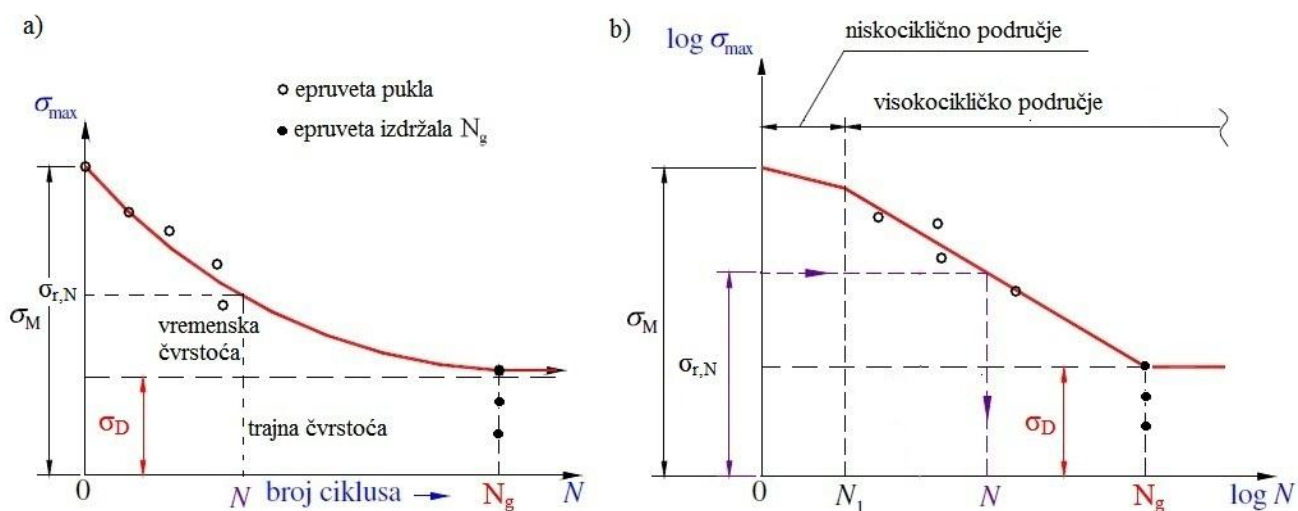
#### 4.2. Wöhlerova krivulja

Wöhlerove (S-N) krivulje predstavljaju najuobičajeniji način opisivanja otpornosti konstrukcijskih detalja na zamorno oštećenje. Wöhlerove krivulje daju odnos između primijenjenog raspona naprezanja  $\sigma$  (eng. Strss-S) i broja ciklusa  $N$  do popuštanja. Određuju se u laboratorijima, provođenjem pokusa zamora uz izvravanje uzorka ciklusima opterećenja

konstantne amplitude do njihovog popuštanja. Pokusi se provode na identičnim uzorcima pri različitim razinama raspona napreznja  $\Delta\sigma$  koji predstavljaju najvažniji parametar opterećenja. U pokusima zamora mogu se upotrebljavati različite vrste opterećenja, ali se najčešće provode pri konstantnim omjerima napreznja između  $r = 0 - 0,1$  [26]. Za svaki od nivoa napreznja bilježi se broj ciklusa napreznja  $N$ , nakon kojeg je došlo do loma epruvete. Rezultati ispitivanja unose se u  $\sigma - N$  dijagram a dobivena krivulja odgovara Wöhlerovoj krivulji. Wöhlerova krivulja se asimptotski približava pravcu  $\sigma = \sigma_D$ , pri čemu se  $\sigma_D$  naziva trajnom dinamičkom čvrstoćom materijala izloženog ciklički promjenjivim napreznjima s koeficijentom asimetrije ciklusa  $r$ . Očito, trajna dinamička čvrstoća materijala je ono maksimalno napreznje ciklusa asimetrije  $r$  pri kojem epruveta doživi gotovo beskonačno mnogo ciklusa, tj. neograničenu trajnost. Jednadžba Wöhlerove krivulje se može napisati izrazom:

$$\sigma_{r,N}^m \cdot N = \sigma_D^m \cdot N_g = \text{konst.}, \quad (14)$$

- $\sigma_{r,N}$  - vremenska dinamička čvrstoća za trajnost u ciklusima  $N$
- $N$  - broj ciklusa do loma pri maksimalnom napreznju ciklusa  $\sigma_{r,N}$
- $N_g$  - broj ciklusa na prijelazu između vremenske i trajne čvrstoće.
- $m$  - eksponent Wöhlerove krivulje tj. nagib krivulje u logaritamskim koordinatama,  $m=3-13$  ovisno o materijalu, obliku strojnog dijela ili vrsti spoja, te vrsti napreznja
- $\sigma_M$  - vlačna čvrstoća



Slika 36. Wöhlerovi dijagrami: a) linearno mjerilo, b) logaritamsko mjerilo

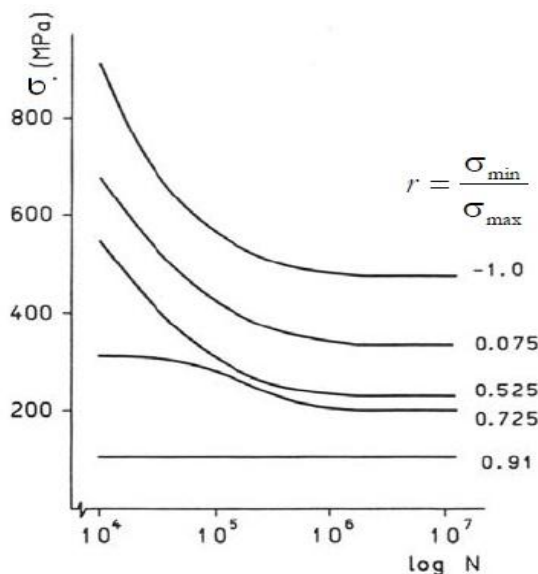
Područja u Wöhlerovom dijagramu (slika 36):

I.  $N < N_1$ : U ovom području lom zamorom dešava se pri elastoplastičnim deformacijama. Ovo je područje niskocikličnog zamora (engl. low-cycle fatigue), pri čemu je vrijednost  $N_1 \approx 10^3 - 10^4$  ciklusa  $\rightarrow$  statička čvrstoća

II.  $N_1 < N < N_g$ : Ovo je područje vremenske (relativne) dinamičke čvrstoće. Kod koje se lom zamorom dešava pri elastičnim deformacijama i konačnom broju ciklusa  $N$ . Ovakav zamor materijala se naziva visokociklični zamor (engl. high-cycle fatigue)  $\rightarrow$  vremenska dinamička čvrstoća

III.  $N > N_g$ : Ovo je područje trajne dinamičke čvrstoće ili dinamičke izdržljivosti  $\rightarrow$  trajna dinamička čvrstoća

Vrijednosti dinamičke čvrstoće ovise o vrsti naprezanja i o omjeru ciklusa naprezanja što je prikazano na slici 37 iz koje je vidljivo da viši omjeri skraćuju zamorni vijek, što se može objasniti činjenicom da je cijeli ciklus u nepovoljnom vlačnom području, kada uslijed visokih vršnih naprezanja, dolazi do bržeg početka zamorne pukotine ali i do njenog bržeg rasta.

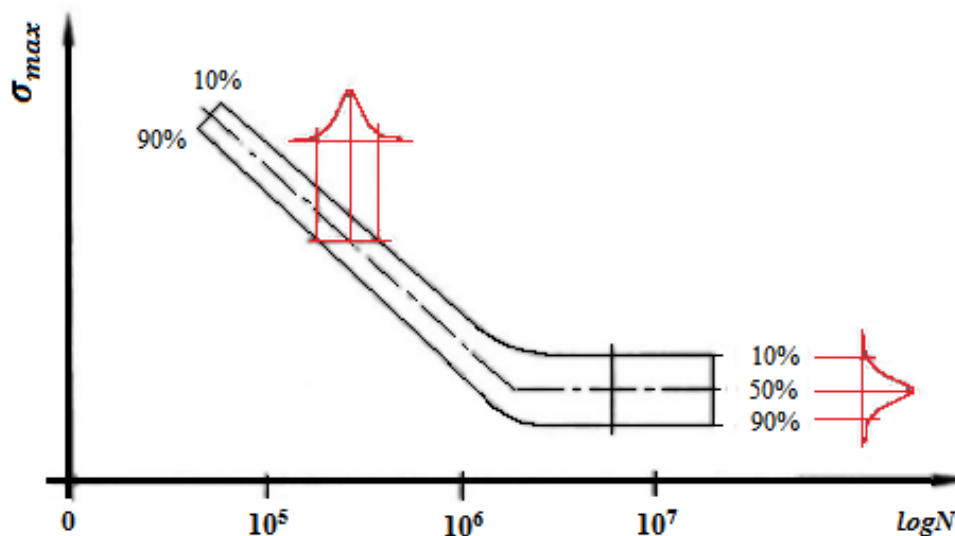


Slika 37. S-N krivulje kod promjene omjera naprezanja [11]

Zbog nehomogenosti materijala Wöhlerova krivulja se za isti materijal pri svakom ispitivanju razlikuju. Moguće je da se za jednaku vrstu naprezanja brojevi ciklusa do loma epruvete odnose čak kao 1:10 [11]. Zbog toga se ispitivanja provode na većem broju epruveta



te se rezultat prikazuje poljem rasipanja ili s više Wöhlerovih krivulja pri čemu svaka prikazuje određeni postotak "preživljavanja" pri određenom naprezanju (slika 38).

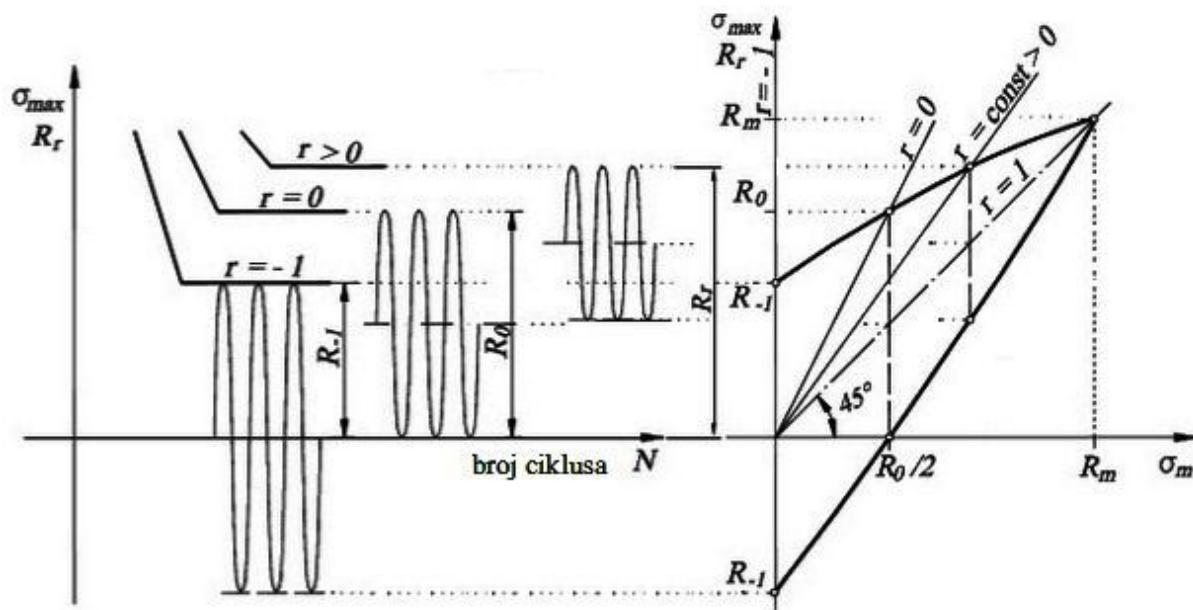


Slika 38. Polje rasipanja kod Wöhlerove krivulje

Wöhlerov dijagram daje podatke o iznosu dinamičke izdržljivosti nekog materijala samo za jedan tip promjenjivog napreznja. Za konstruktore je često potreban podatak o iznosu dinamičke izdržljivosti nekog materijala za različite tipove promjenjivog napreznja, a takve podatke nam daje Smithov dijagram.

#### 4.3. Smithov dijagram

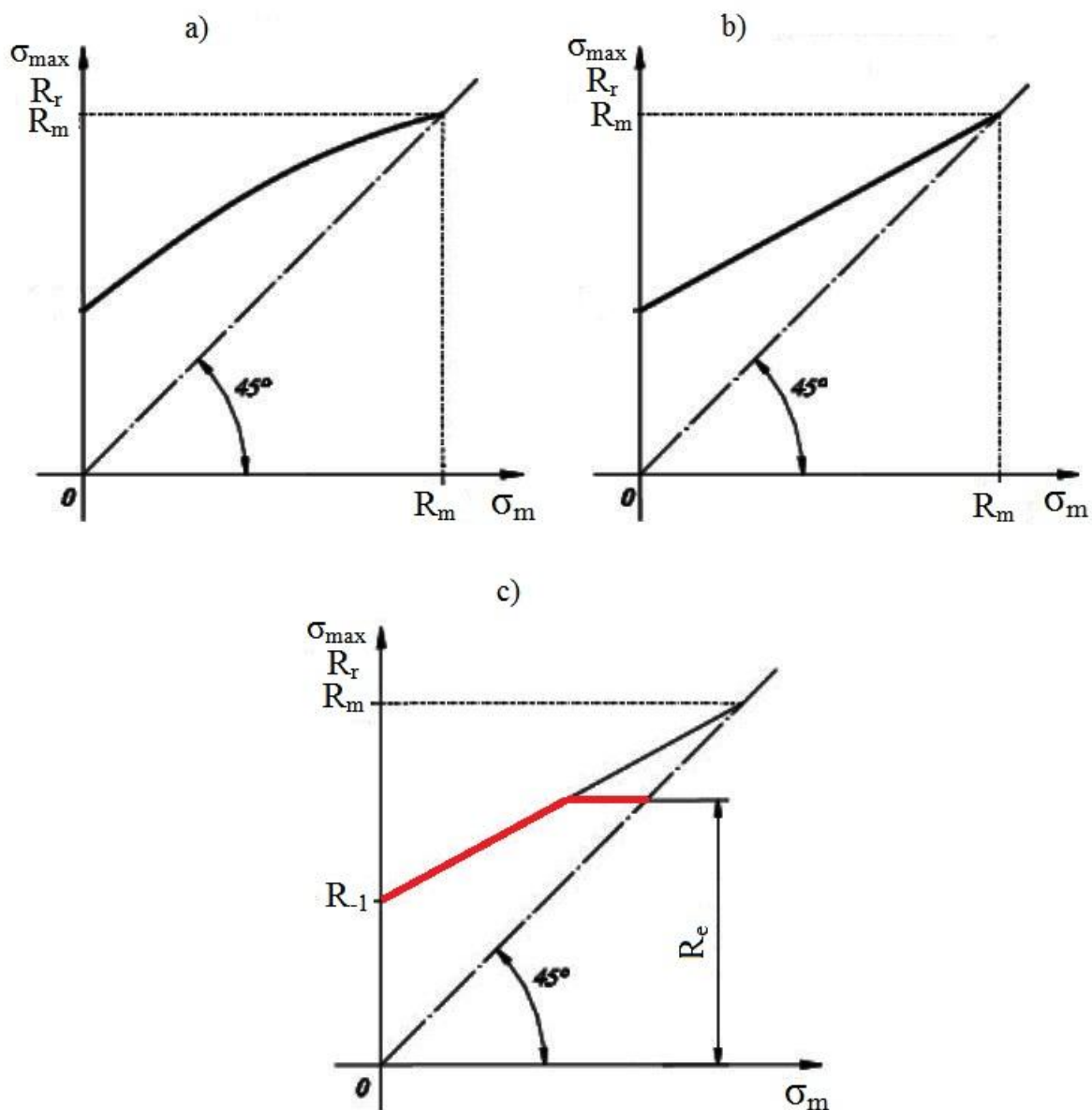
Snimanjem odgovarajućeg broja Wöhlerovih krivulja za različite vrijednosti srednjeg napreznja  $\sigma_m$ , a za određeni oblik opterećenja i isti ciklus, dobiju se vrijednosti trajne dinamičke čvrstoće u ovisnosti o  $\sigma_m$ . Smithov dijagram se dobiva unošenjem u njegove koordinate ( $\sigma_{max} = R_r, \sigma_m$ ) vrijednosti maksimalnog  $\sigma_{max} = R_r$  i minimalnog napreznja  $\sigma_{min}$  na nivou trajne dinamičke čvrstoće za pripadajuću srednju vrijednost napreznja  $\sigma_m$ , za nekoliko ciklusa različitih asimetrija  $r$ , slika 39.



Slika 39. Smithov dijagram trajne dinamičke čvrstoće [26]

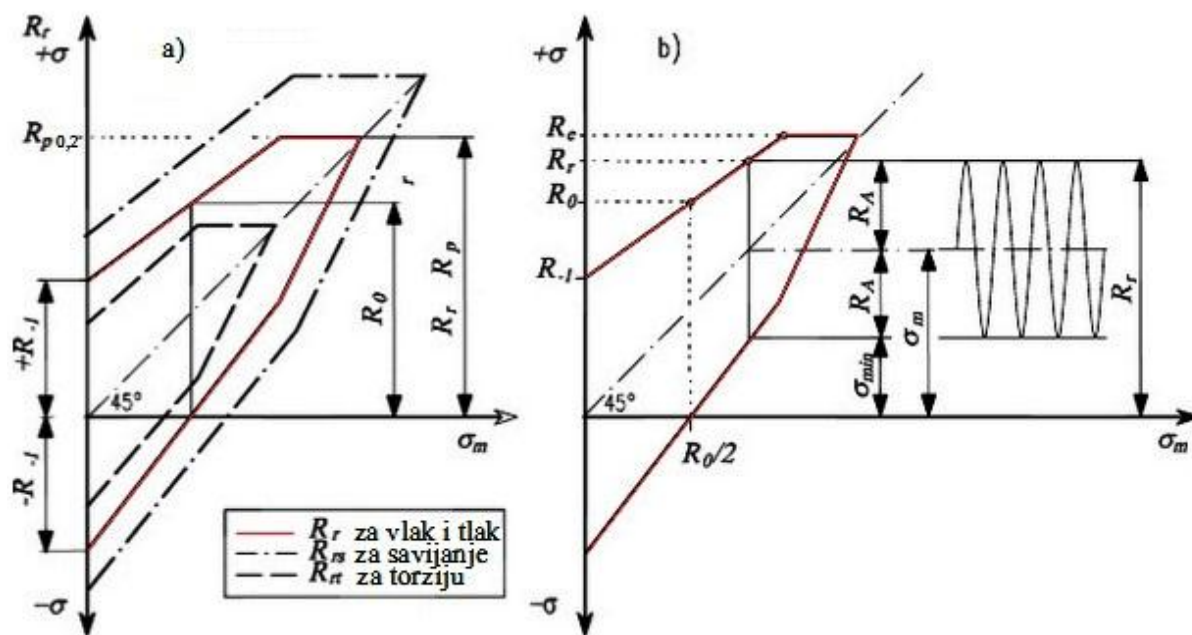
Simetrala dijagrama ucrtava se pod kutom od  $45^\circ$  i predstavlja pravac, čije su ordinate jednake apscisama tj. srednjim naprezanjima ciklusa. Očito je da konture Smithovog dijagrama omeđuju polje trajne dinamičke čvrstoće. Prijelaz maksimalnog ili minimalnog naprezanja izvan konture dijagrama znači zamorni lom.

Smithovi dijagrami različiti su za različite vrste naprezanja, (slika 41). Iz slike je vidljivo da najveću površinu zauzima Smithov dijagram za savijanje, a najmanju za torziju, što znači da je dinamička čvrstoća najveća kod savijanja a najmanja kod torzije. Pri tome gornja krivulja (maksimalnih naprezanja ciklusa) Smithovog dijagrama predstavlja liniju trajne dinamičke čvrstoće pa se najčešće i crta samo ta linija. Na taj način se Smithov dijagram aproksimira kao linija koja povezuje obično samo jednu (najčešće  $R_{-1}$ ) karakteristiku dinamičke čvrstoće i jednu ( $R_m$  ili  $R_e$ ) karakteristiku statičke čvrstoće, (slika 42b.) Najsličnija aproksimacija Smithovog dijagrama jest u obliku (Gerberove) parabole između točaka  $(0, R_{-1})$  i  $(R_m, R_m)$ , (slika 41a), ali se on najčešće aproksimira pravcem između tih istih točaka, slika 41b u tom slučaju se taj pravac naziva Goodmanova linija. Kod rastezljivih materijala se ova linija trajne dinamičke čvrstoće obično ograničava granicom tečenja  $R_e$ , jer plastične deformacije strojnih dijelova najčešće nisu dopuštene [26].



Slika 40. Načini aproksimacije linije trajne dinamičke čvrstoće:

a) Gerberova parabola, b) Goodmanova linija, c) Goodmanova linija presječena granicom tečenja



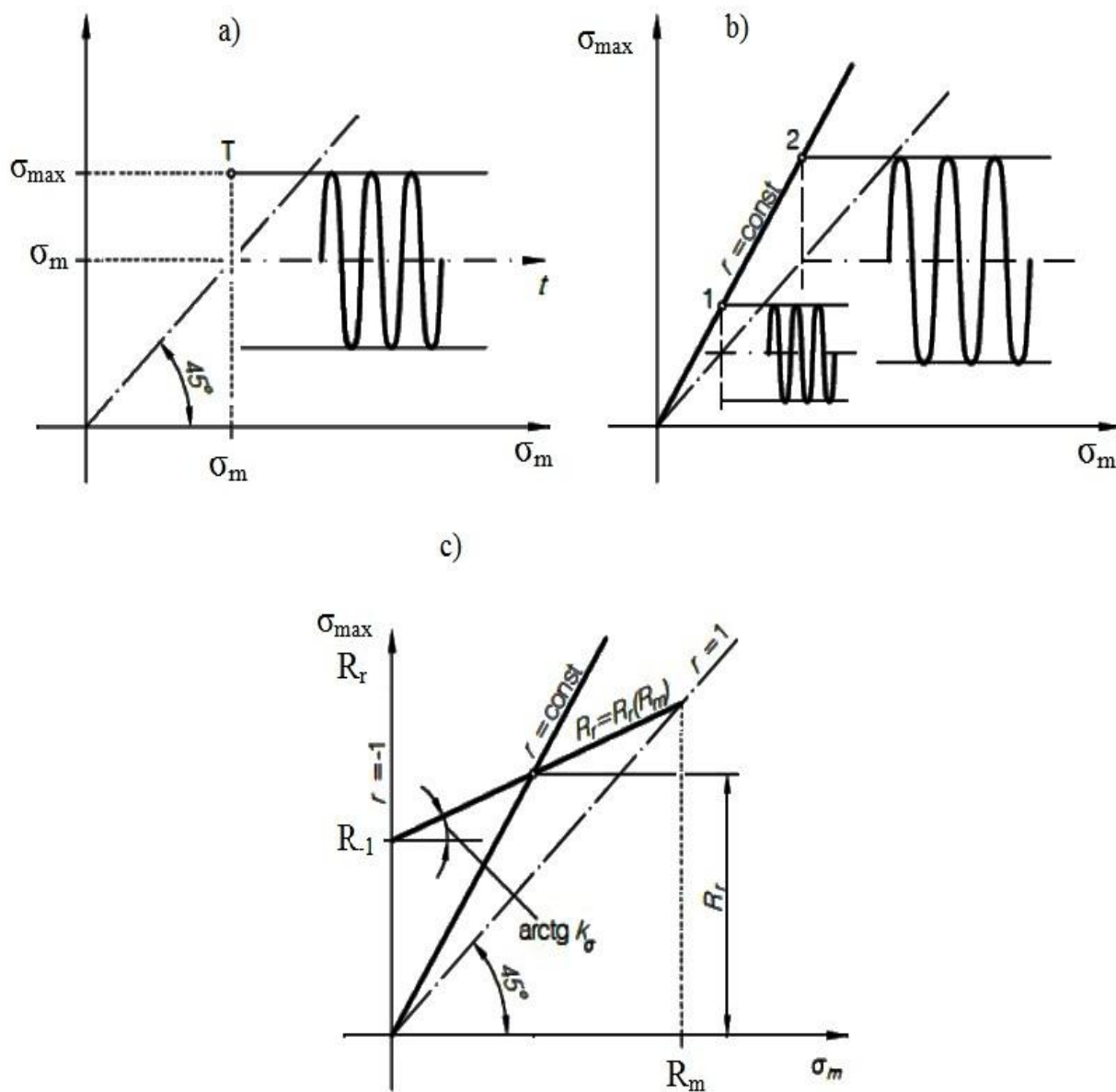
**Slika 41. Smithov dijagram trajne dinamičke čvrstoće: a) za različite vrste opterećenja, b) Smithov dijagram za poznate tri karakteristike čvrstoće  $R_1$ ,  $R_0$ ,  $R_e$**

Treba zapaziti da svaka točka T u koordinatama  $(\sigma_m, \sigma_{max})$  Smithovog dijagrama definira određeno cikličko naprezanje, slika 42. Naime, uz poznato srednje i maksimalno naprezanje, koje definira točka T, poznata je i amplituda naprezanja  $\sigma_a$ , te minimalno naprezanje  $\sigma_{min}$ , pa je ciklus potpuno definiran. Također, svaki pravac povučen kroz ishodište je geometrijsko mjesto maksimalnih naprezanja različitih ciklusa jednakog koeficijenta asimetrije  $r$ . Naime, koeficijent smjera k tog pravca je:

$$k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_m} = \frac{2\sigma_{max}}{\sigma_{max} + \sigma_{min}} = \frac{2}{1+r} \quad (14)$$

Odatle slijedi da svaka točka pravca predstavlja ciklus naprezanja jednakog koeficijenta asimetrije. Zato se taj pravac označuje s  $r = \text{konst.}$  i naziva pravcem opterećenja, slika 43b. Granično naprezanje tj. dinamička čvrstoća za taj  $r$  se nalazi na tom pravcu. Kako se ona nalazi i na gornjoj konturi Smithovog dijagrama, očito je da se trajna dinamička čvrstoća za određeni koeficijent asimetrije ciklusa naprezanja određuje kao presjecište pravca opterećenja  $r = \text{konst.}$  i linije trajne dinamičke čvrstoće  $R_r = f(R_m)$ , slika 42c, gdje je: a) jedna točka - jedno cikličko naprezanje, b) pravac kroz ishodište - pravac opterećenja - niz različitih cikličkih naprezanja iste asimetrije ciklusa, c) dinamička čvrstoća za ciklička naprezanja s

koeficijentom asimetrije ciklusa  $r$  jednaka je ordinati presjeka pravca opterećenja i linije odgovarajuće dinamičke čvrstoće



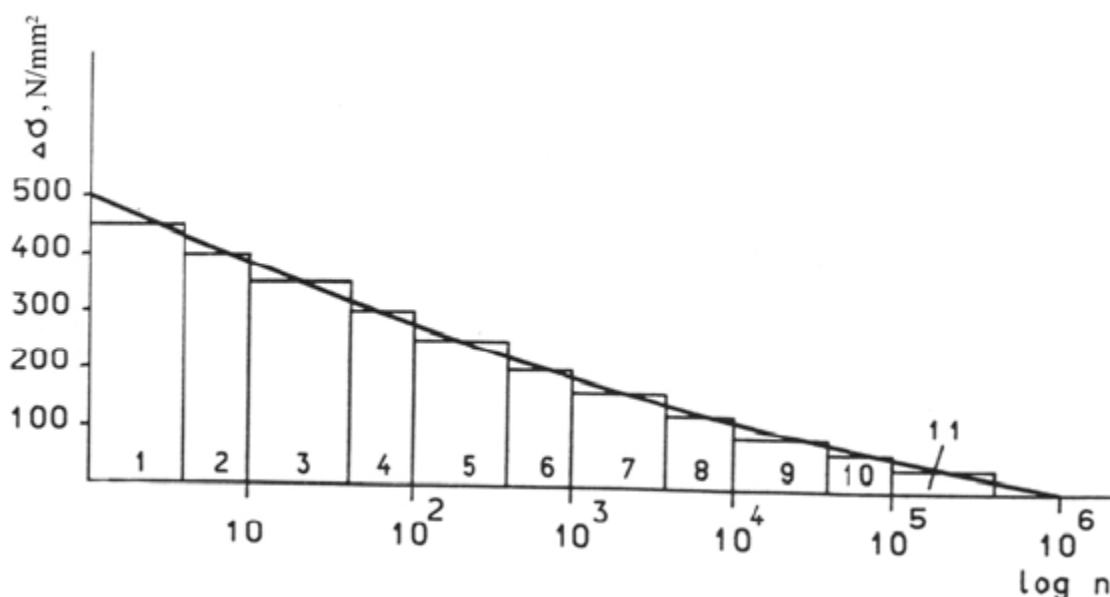
Slika 42. Osnovni principi Smithovog dijagrama [26]

#### 4.4. Cikličko opterećenje promjenjive amplitude

Strojni dijelovi i konstrukcije su često izloženi djelovanju opterećenjem promjenjive amplitude, a određivanje njihove čvrstoće ili vijeka trajanja i danas predstavlja jedan od najtežih problema u strojarstvu. U slučaju kada se opterećenje i rasterećenje ne pojavljuju u ciklusima konstantne amplitude, nego je ona promjenjiva, dolazi do gomilanja oštećenja koje može izazvati gubitak cjelovitosti uslijed zamora. Osnovu za rješavanje ovog problema postavili su Palmgren i Miner pravilom o linearnom gomilanju oštećenja uslijed zamora materijala. Za strojni dio izložen cikličkom opterećenju promjenjive amplitude, koja ostaje konstantna kroz  $n_i$  ciklusa doći će do loma uslijed zamora kada se ispuni uvjet [23]:

$$\sum_i D_i = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} + \dots + \frac{n_k}{N_{fk}} \geq 1 \quad (15)$$

gdje je  $D_i$  zamorno oštećenje od  $n_i$  ciklusa na nivou maksimalnog naprezanja  $\sigma_i$ ,  $k$  broj blokova naprezanja,  $n_i$  broj ciklusa naprezanja u bloku naprezanja i konstantnog raspona naprezanja  $\Delta\sigma_i$ , a  $N_{fi}$  potrebni broj ciklusa do gubitka cjelovitosti za promatrani blok  $i$ .

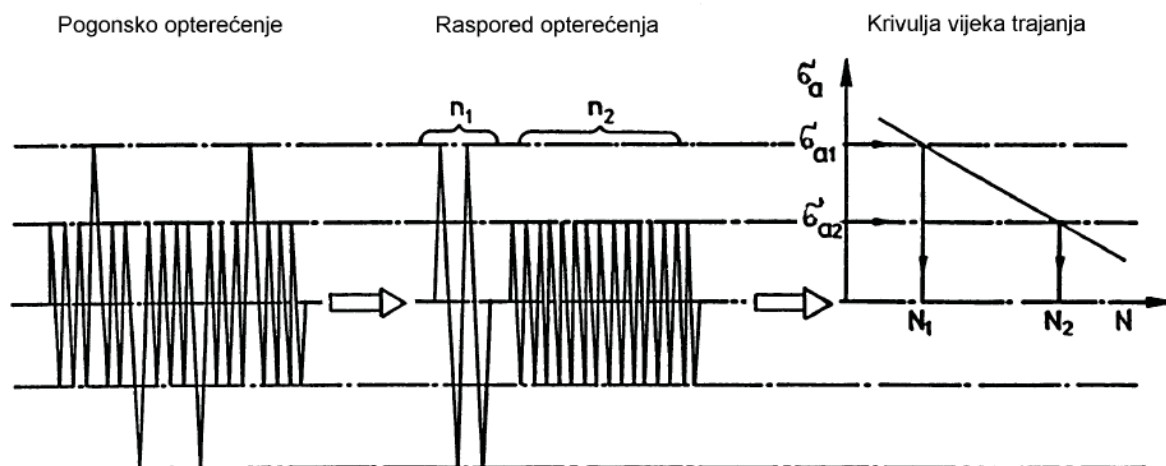


Slika 43. Razdioba naprezanja podijeljena u blokove konstantnog naprezanja [2]

Miner je 1945. godine prvi predložio izvod pravila linearnog akumuliranja oštećenja. Pretpostavio je konstantnu vrijednost rada  $W$  koji se može apsorbirati do popuštanja, kao i da je rad koji se apsorbira za vrijeme  $n_i$  sličnih ciklusa razmjeran broju ciklusa[2]:

$$\frac{W_i}{W} = \frac{n_i}{N_i'} \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^k W_i = W \quad (17)$$



Slika 44. Linearna akumulacija zamora Palmgren – Miner) [28]

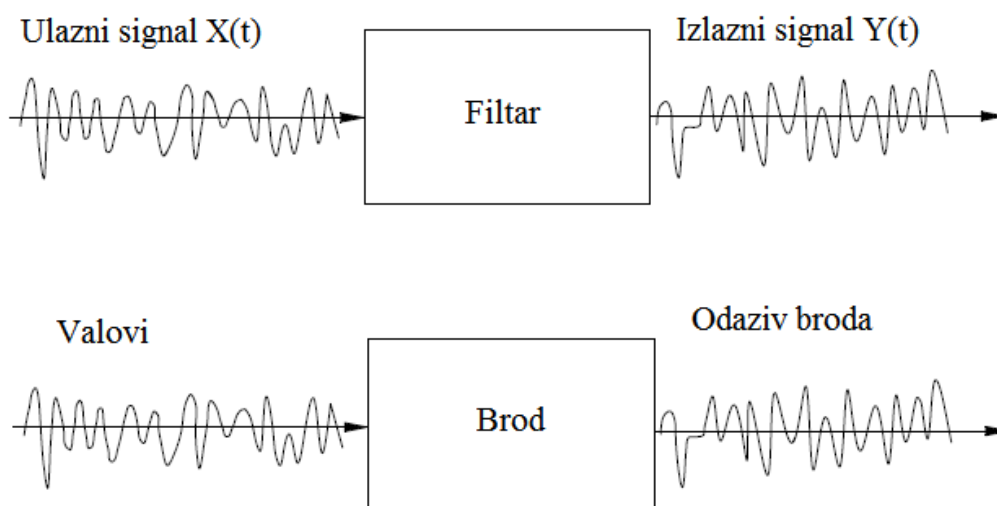
Izvedeći pravilo, Miner je pretpostavio da ciklusi opterećenja ispod granice zamora ne pridonose zamornom oštećenju, što se pokazalo netočnim, osim toga hipoteza zanemaruje učinak redoslijeda opterećenja, pretpostavljajući da je zamorno oštećenje u jednom ciklusu neovisno o stanju materijala koje su uzrokovali prethodni ciklusi [11].

Ako bi strojni dio podvrgnut stalno promjenjivim opterećenjima, u kojem se maksimalno opterećenje javlja rijetko, dimenzionirali prema tom opterećenju on bi bio predimenzioniran. Da se to izbjegne pri stalno promjenjivim opterećenjima upotrebljava se bliža značajka tijeka naprezanja predložena sumarnom krivuljom učestalosti promjenjivog naprezanja kojom je definiran spektar naprezanja odnosno opterećenja.

Cilj ovoga rada nije ispitati parametre zamora materijala u konstantnom režimu opterećenja nego vidjeti kako vremenski redoslijed blokova naprezanja unutar spektra opterećenja utječe na životni vijek konstrukcije tj. materijala.

## 5. GENERIRANJE SPEKTRA OPTEREĆENJA

Glavni cilj ovoga rada vidjeti da li i na koji način vremenski slijed opterećenja utječe na životni vijek konstrukcije. U ovom poglavlju će se nastojati odabrati takav spektar opterećenja koji će donekle odgovarati realnim uvjetima. U tu svrhu će se spektar opterećenja temeljiti na podacima o učestalosti pojavljivanja valova određene visine. Ulazni signal (morski val) sadrži komponente različitih frekvencija koje se povećavaju ili smanjuju te tvore izlazni signal ovisno o svojstvu "filtera". (slika 45). Također se pretpostavlja takav "filter" (značajke broda) koji ulazni signal (morski valovi) linearno mijenja u izlazni signal. [29].

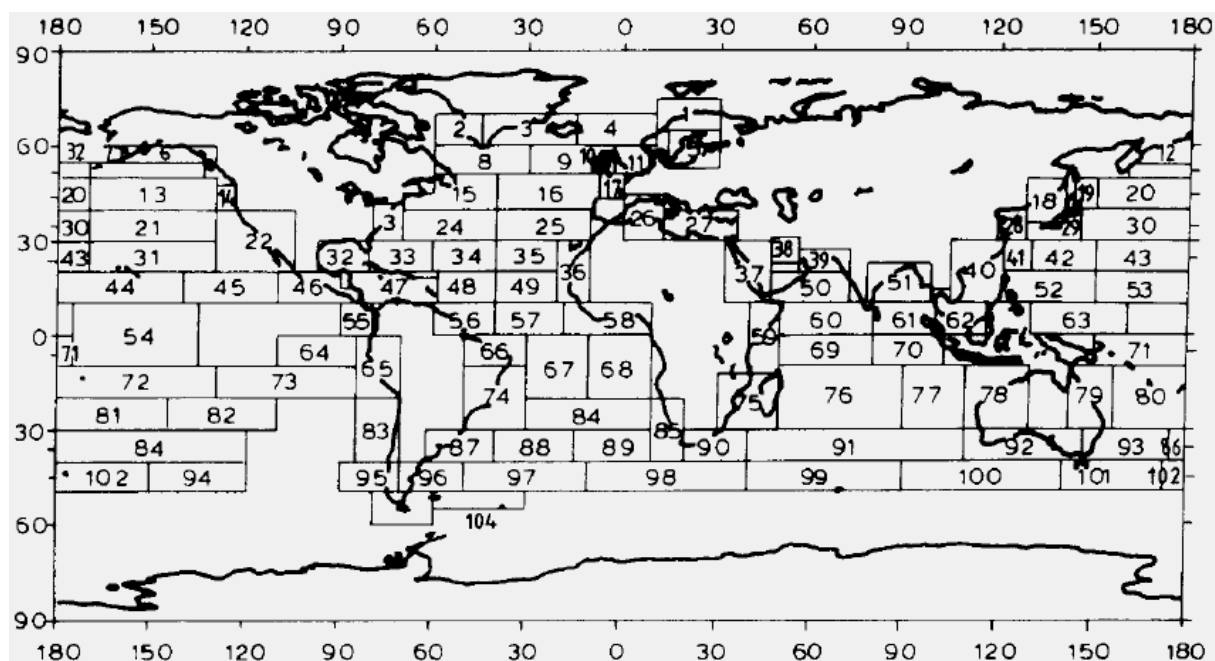


**Slika 45. Analogija njihanja broda i djelovanja elektronskog filtera [29]**

Prilikom generiranja spektra opterećenja pretpostavit će se da je amplituda naprezanja u brodskoj konstrukciji linearno proporcionalna amplitudi morskog vala [29]. Ta pretpostavka nije u potpunosti točna, međutim približno realno opisuje amplitude naprezanja brodske konstrukcije.

Atlas valova Globalne statistike valova, objavili su Hogben, Dacunah i Oliver 1986. god., koji se temelji na 55 milijuna vizualnih zapažanja između 1854. i 1984. godine [29]. Prema tom atlasu svjetska mora podijeljena su na zone (Marsdenovi kvadranti) slika 46, u kojemu svaka zona ima svoje specifične uvijete.





Slika 46. Atlas mora podijeljen na zone [30]

Statistika valova izrađena na temelju vizualnih zapažanja je manje pouzdana od one temeljene na direktnim mjerenjima. Razlog tomu je činjenica da pomorski kapetani izbjegavaju loše uvijete plovidbe, te se smatra da objavljene statističke tablice ne obuhvaćaju iznimno oštre vremenske uvijete i stanja mora. Ta je statistika, usprkos nedostacima, primjenjiva za brodove koji imaju određenu slobodu izbjegavanja loših vremenskih uvjeta [29].

U tablici 3 prikazani su podaci koji obuhvaćaju područje sjeverni Atlantik (područja 8, 9, 15, 16) o značajnim valnim visinama  $H_s$  [m] i dominantnim periodom  $T_s$  [s], za svaku valnu visinu i period zabilježen je i broj pojavljivanja tih valova svedeni na 100000 promatranja. Tablica obuhvaća sve smjerove nailaska valova.

Tablica 3. Podaci o stanju mora u sjevernom Atlantiku (područje 8, 9, 15, 16)

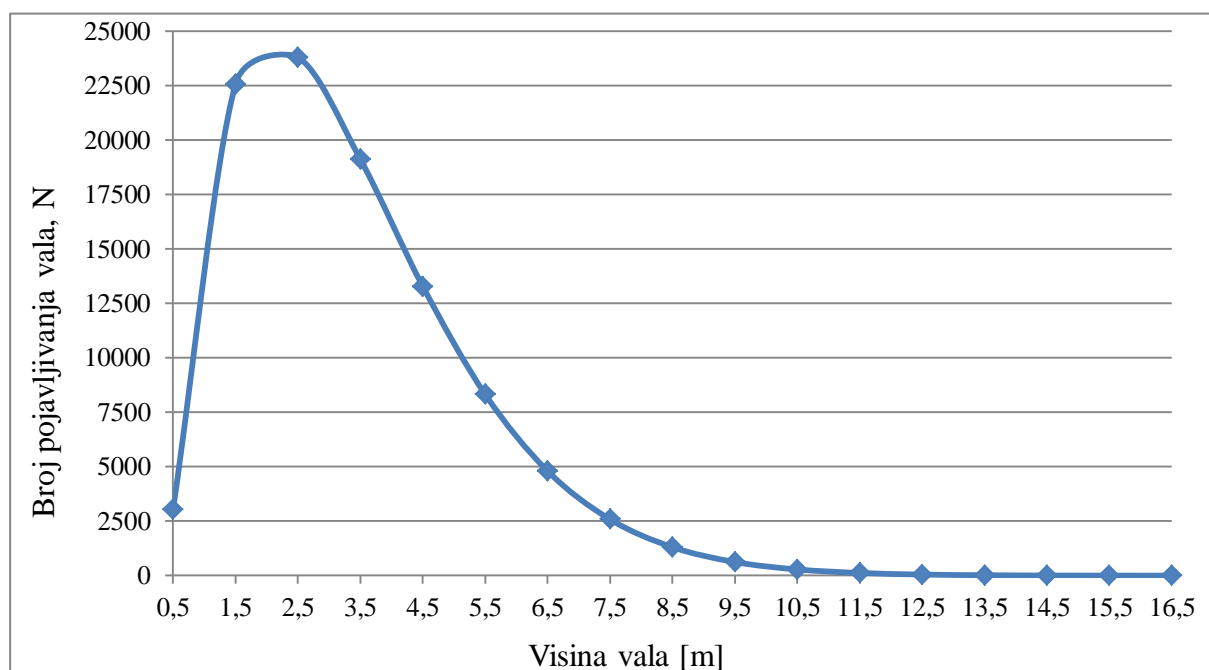
| Hs / Iz | 1,5 | 2,5 | 3,5 | 4,5   | 5,5   | 6,5    | 7,5    | 8,5    | 9,5    | 10,5   | 11,5   | 12,5  | 13,5  | 14,5 | 15,5 | 16,5 | 17,5 | 18,5 | SUM     |
|---------|-----|-----|-----|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|------|------|------|------|------|---------|
| 0,5     | 0   | 0   | 1,3 | 133,7 | 865,6 | 1186   | 634,2  | 186,3  | 36,9   | 5,6    | 0,7    | 0,1   | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 3050    |
| 1,5     | 0   | 0   | 0   | 29,3  | 986   | 4976   | 7738   | 5569,7 | 2375,7 | 703,5  | 160,7  | 30,5  | 5,1   | 0,8  | 0,1  | 0    | 0    | 0    | 22575   |
| 2,5     | 0   | 0   | 0   | 2,2   | 197,5 | 2158,8 | 6230   | 7449,5 | 4860,4 | 2066   | 644,5  | 160,2 | 33,7  | 6,3  | 1,1  | 0,2  | 0    | 0    | 23810   |
| 3,5     | 0   | 0   | 0   | 0,2   | 34,9  | 695,5  | 3226,5 | 5675   | 5099,1 | 2838   | 1114,1 | 337,7 | 84,3  | 18,2 | 3,5  | 0,6  | 0,1  | 0    | 19128   |
| 4,5     | 0   | 0   | 0   | 0     | 6     | 196,1  | 1354,3 | 3288,5 | 3857,5 | 2685,5 | 1275,2 | 445,1 | 130,9 | 31,9 | 6,9  | 1,3  | 0,2  | 0    | 13279   |
| 5,5     | 0   | 0   | 0   | 0     | 1     | 51     | 498,4  | 1602,9 | 2372,7 | 2008,3 | 1126   | 463,6 | 150,9 | 41   | 9,7  | 2,1  | 0,4  | 0,1  | 8328    |
| 6,5     | 0   | 0   | 0   | 0     | 0,2   | 12,6   | 167    | 690,3  | 1257,9 | 1268,6 | 825,9  | 386,8 | 140,8 | 44,2 | 10,9 | 2,5  | 0,5  | 0,1  | 4808    |
| 7,5     | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 3      | 52,1   | 270,1  | 594,4  | 703,2  | 524,9  | 276,7 | 111,7 | 36,7 | 10,2 | 2,5  | 0,6  | 0,1  | 2586    |
| 8,5     | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0,7    | 15,4   | 97,9   | 255,9  | 350,6  | 296,9  | 174,6 | 77,6  | 27,5 | 8,4  | 2,2  | 0,5  | 0,1  | 1308    |
| 9,5     | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0,2    | 4,3    | 33,2   | 101,9  | 159,9  | 152,2  | 99,2  | 48,3  | 18,7 | 6,1  | 1,7  | 0,4  | 0,1  | 626     |
| 10,5    | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0      | 1,2    | 10,7   | 37,9   | 67,5   | 71,7   | 51,5  | 27,3  | 11,4 | 4    | 1,2  | 0,3  | 0,1  | 285     |
| 11,5    | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0      | 0,3    | 3,3    | 13,3   | 26,6   | 31,4   | 24,7  | 14,2  | 6,4  | 2,4  | 0,7  | 0,2  | 0,1  | 124     |
| 12,5    | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0      | 0,1    | 1      | 4,4    | 9,9    | 12,8   | 11    | 6,8   | 3,3  | 1,3  | 0,4  | 0,1  | 0    | 51      |
| 13,5    | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0      | 0      | 0,3    | 1,4    | 3,5    | 5      | 4,6   | 3,1   | 1,6  | 0,7  | 0,2  | 0,1  | 0    | 21      |
| 14,5    | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0      | 0      | 0,1    | 0,4    | 1,2    | 1,8    | 1,8   | 1,3   | 0,7  | 0,3  | 0,1  | 0    | 0    | 8       |
| 15,5    | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0      | 0      | 0      | 0,1    | 0,4    | 0,6    | 0,7   | 0,5   | 0,3  | 0,1  | 0,1  | 0    | 0    | 3       |
| 16,5    | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0,1    | 0,2    | 0,2   | 0,2   | 0,1  | 0,1  | 0    | 0    | 0    | 1       |
| SUM:    | 0   | 0   | 1   | 165   | 2091  | 9280   | 19922  | 24879  | 20870  | 12898  | 6245   | 2469  | 837   | 249  | 66   | 16   | 3    | 1    | 100 000 |

Za potrebe ovoga rada nisu se promatrale visine valova za svaku pojedinu frekvenciju nego je uzeta ukupna suma broja pojavljivanja određene visine vala. U tablici 4 su prikazani podaci o ukupnom broju pojavljivanja valova određene visine.

**Tablica 4. Suma pojavljivanja određenih valova**

| $H_s$    | 0,5  | 1,5   | 2,5   | 3,5   | 4,5   | 5,5  | 6,5  | 7,5  | 8,5  | 9,5 | 10,5 | 11,5 | 12,5 | 13,5 | 14,5 | 15,5 | 16,5 |
|----------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| $\sum N$ | 3050 | 22575 | 23810 | 19128 | 13289 | 8328 | 4806 | 2586 | 1309 | 626 | 285  | 124  | 51   | 21   | 8    | 3    | 1    |

Na slici 46 prikazan je spektar valnih visina u odnosu na broj pojavljivanja



**Slika 47. Spektar valnih visina**

Na osnovi visine vala i broja pojavljivanja kreirat će se spektar opterećenja s kojim će se opterećivati ispitni uzorak.

Da bi vidjeli da li i na koji način vremenski redoslijed opterećenja utječe na životni vijek konstrukcije bit će generirane dvije različite vrste spektra u kojima će biti različito vremensko pojavljivanje opterećenja ( $\sigma_i$ ,  $N_i$ ). Do loma epruvete ne smije doći za vrijeme trajanja spektra opterećenja jer u tom slučaju se ne može dobiti informaciju koliko oštećenja bi uzrokovao cjelokupni spektar. Zbog toga je dio epruveta ispitan konstantnom amplitudom (osnovno opterećenje) do loma te se bilježi broj ciklusa. Epruvete koje se ispituju spektrom opterećenja nakon što taj spektar opterećenja završi na svakom ispitnom uzorku nastaviti će se

opterećivanje osnovnim spektrom opterećenja do konačnog loma ispitnog uzorka. Usporedbom broja ciklusa osnovnog spektra ovih epruveta s brojem ciklusa koji su izdržale epruvete ispitane samo osnovnim spektrom može se procijeniti koliko je pojedini spektar opterećenja uzrokovao oštećenje u epruveti.

Da bi odredili koliko je zadani spektar opterećenja akumulirao oštećenje primijenjena je sljedeća procedura:

1. Definira se vrijednost osnovne amplitude opterećenja koja dovodi do loma epruvete u prihvatljivom vremenskom periodu (maksimalno dva dana po ispitnom uzorku). U svrhu dobivanja osnovne amplitude provest će se statički vlačni pokus te će se na temelju vlačne čvrstoće procijeniti početna osnovna amplituda naprezanja za dinamička ispitivanja.

$$\sigma_o \approx 0,6 \cdot R_m \quad (18)$$

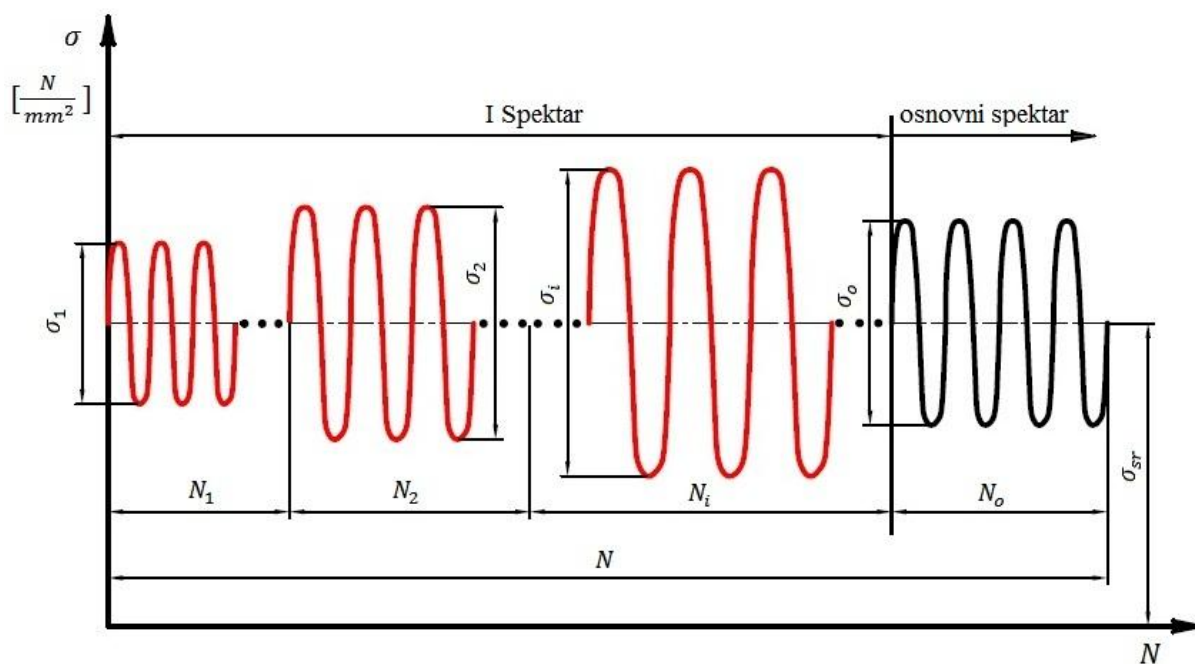
2. Definirat će se maksimalna amplituda u spektru  $\sigma_{max}$  te u odnosu na nju sve ostale amplitude. Prilikom odabira maksimalne amplitude treba voditi računa da nije prevelika kako ne bi došlo do loma epruvete prije nego završi cijeli spektar. S druge strane mora biti dovoljno velika da izazove mjerljivu akumulaciju oštećenja. Nakon što se epruveta optereti cjelokupnim definiranim spektrom, opterećivanje do loma nastaviti će se osnovnom amplitudom.

$$\sigma_{max} \approx 0,95 \cdot R_m \quad (19)$$

3. Iznose ostalih amplituda u spektru ( $\sigma_i$ ) generira se tako da njihovi omjeri odgovaraju omjerima visine valova.

4. Omjer broja ciklusa pojavljivanja opterećenja odgovara omjeru učestalosti pojave odgovarajućeg vala

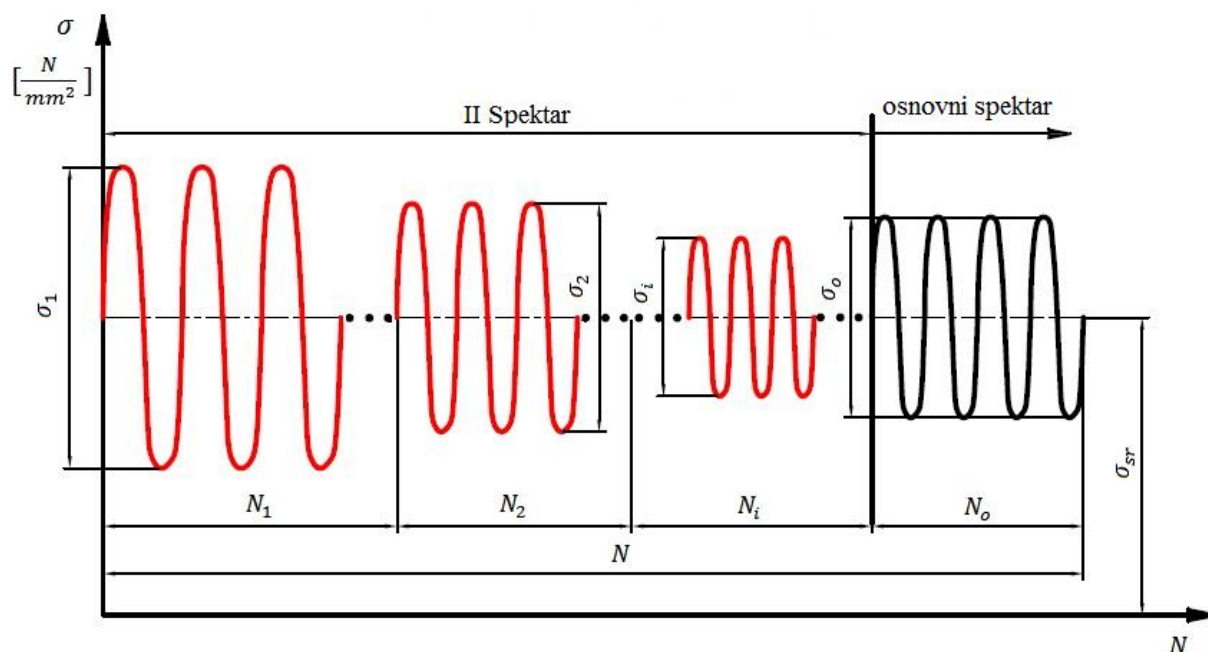
**I Spektar - amplituda opterećenja raste od najmanje do najveće vrijednosti:**



**Slika 48. I Spektar opterećenja**

**Tablica 5. Parametri za I spektar**

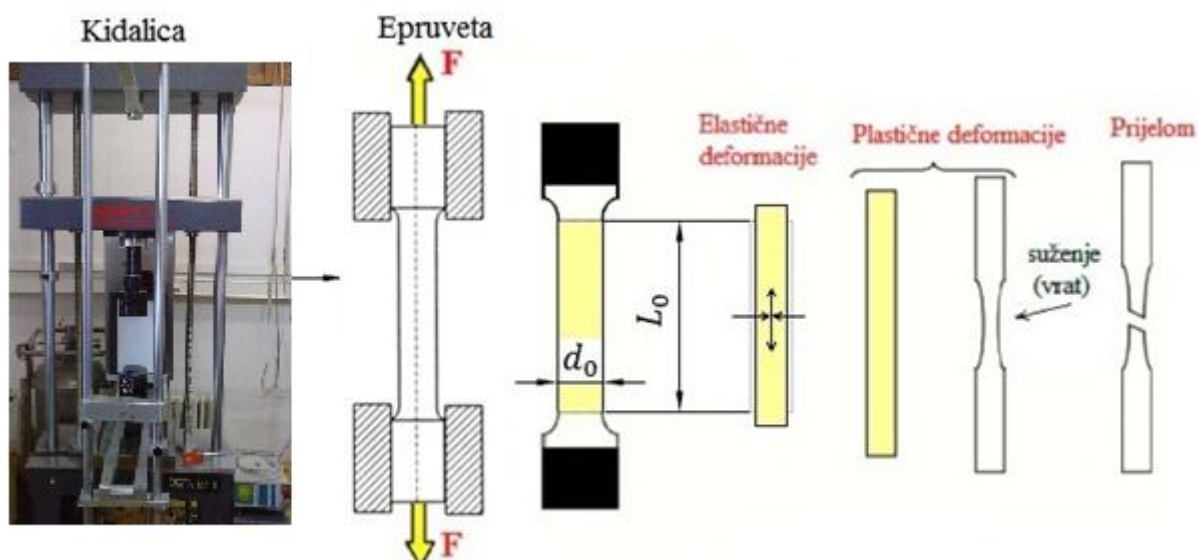
| $V, \sigma$                 | 1              | 2              | 3              | 4              | 5              | 6             | 7               | 8              | 9               | 10              | 11             | 12              | 13              | 14             | 15              | 16              | 17   |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|------|
| $H_s$                       | 0,5            | 1,5            | 2,5            | 3,5            | 4,5            | 5,5           | 6,5             | 7,5            | 8,5             | 9,5             | 10,5           | 11,5            | 12,5            | 13,5           | 14,5            | 15,5            | 16,5 |
| $\frac{\sigma_i}{\sigma_M}$ | $\frac{1}{33}$ | $\frac{1}{11}$ | $\frac{5}{33}$ | $\frac{7}{33}$ | $\frac{3}{11}$ | $\frac{1}{3}$ | $\frac{13}{33}$ | $\frac{5}{11}$ | $\frac{17}{33}$ | $\frac{19}{33}$ | $\frac{7}{11}$ | $\frac{23}{33}$ | $\frac{25}{33}$ | $\frac{9}{11}$ | $\frac{29}{33}$ | $\frac{31}{33}$ | 1    |
| $N_i$                       | 3050           | 22575          | 23810          | 19128          | 13289          | 8328          | 4806            | 2586           | 1309            | 626             | 285            | 124             | 51              | 21             | 8               | 3               | 1    |

**II Spektar - amplituda opterećenja ide od najveće do najmanje vrijednosti:****Slika 49. II Spektar opterećenja****Tablica 6. Parametri za II spektar**

| $V, \sigma$                 | 17   | 16              | 15              | 14             | 13              | 12              | 11             | 10              | 9               | 8              | 7               | 6             | 5              | 4              | 3              | 2              | 1              |
|-----------------------------|------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $H_s$                       | 16,5 | 15,5            | 14,5            | 13,5           | 12,5            | 11,5            | 10,5           | 9,5             | 8,5             | 7,5            | 6,5             | 5,5           | 4,5            | 3,5            | 2,5            | 1,5            | 0,5            |
| $\frac{\sigma_i}{\sigma_M}$ | 1    | $\frac{31}{33}$ | $\frac{29}{33}$ | $\frac{9}{11}$ | $\frac{25}{33}$ | $\frac{23}{33}$ | $\frac{7}{11}$ | $\frac{19}{33}$ | $\frac{17}{33}$ | $\frac{5}{11}$ | $\frac{13}{33}$ | $\frac{1}{3}$ | $\frac{3}{11}$ | $\frac{7}{33}$ | $\frac{5}{33}$ | $\frac{1}{11}$ | $\frac{1}{33}$ |
| $N_i$                       | 1    | 3               | 8               | 21             | 51              | 124             | 285            | 626             | 1309            | 2586           | 4806            | 8328          | 13289          | 19128          | 23810          | 2257           | 3050           |

### 5.1. Statički vlačni pokus

Statičkim vlačnim pokusom ispituje se elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog naprezanja. Na osnovi statičkog vlačnog pokusa utvrđuju se osnovna mehanička svojstva materijala, kao što su vlačna čvrstoća, granica razvlačenja, prekidna čvrstoća itd.[1] Ispitivanje se provodi na uređajima koji se nazivaju kidalice, a na kojima se epruvete okruglog ili poprečnog presjeka kontinuirano opterećuju do loma (Slika50).



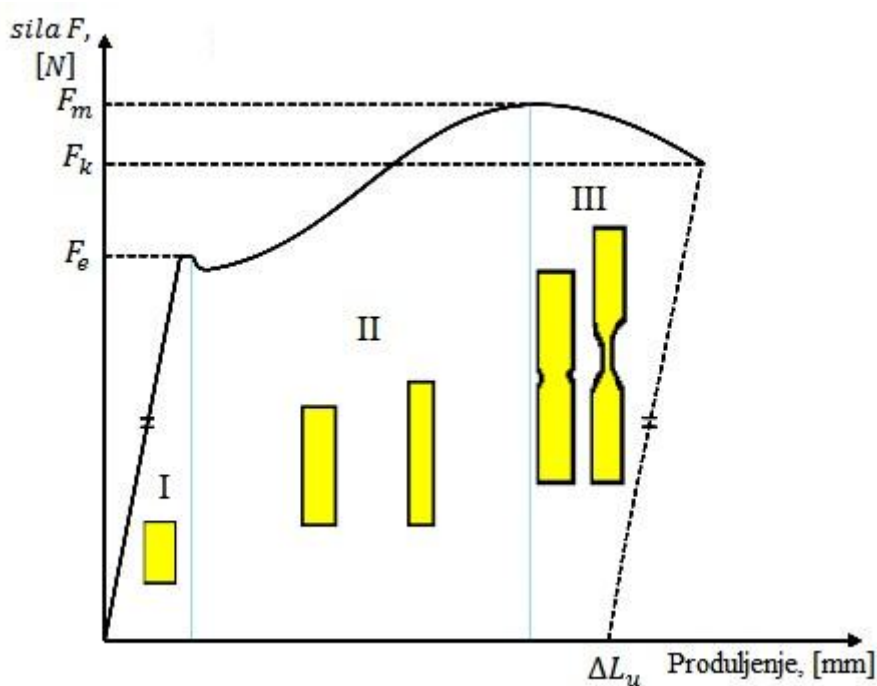
Slika 50. Tijek statičkog vlačnog pokusa

U ovom slučaju statički vlačni pokus je potreban da bi se procijenila amplituda osnovnog opterećenja. Glavni kriterij za odabir amplitude osnovnog opterećenja je vrijeme trajanja ispitivanja koje ne smije trajati niti prekratko niti predugo. Kao ulazna vrijednost amplitude osnovnog opterećenja bit će  $\sigma_0 = 0,6 \cdot R_m$ , te će se iterativno korigirati do vrijednosti da vrijeme do loma bude između 8 i 15 sati.

Pod djelovanjem sile  $F$  na početnu duljinu epruvete  $L_0$ , dolazi do produljenja epruvete, što rezultira promjenom poprečnog presjeka od  $d_0$ , do  $d$ , sve do pojave loma epruvete. Opterećenje i promjena duljine se kontinuirano mjeri i koristi da bi se odredio odnos naprezanje - deformacija. Kidalica za vrijeme statičkog vlačnog pokusa šalje podatke u računalo te program za obradu podataka crta dijagram sila - produljenje",  $F - \Delta L$  koji je za konstrukcijski čelik u normaliziranom stanju prikazan na slici 51.

Prvi dio dijagrama  $F - \Delta L$  prikazuje linearnu ovisnost sile i produljenja, koja vrijedi sve do vrijednosti sile  $F_e$  - sile na granici tečenja. Nakon dostizanja te sile epruveta se nastavlja produljivati uz mali pad sile. U drugom dijelu više nema linearne ovisnosti između povećanja sile i produljenja. Opterećenje se povećava sve do dostizanja maksimalne sile  $F_m$ , nakon koje se u trećem dijelu dijagrama epruveta nastavlja produljivati uz smanjenje potrebne sile zbog smanjenja poprečnog presjeka epruvete. Pri vrijednosti sile  $F_k$  dolazi do loma epruvete. Kada bi "sastavili" puknutu epruvetu i izmjerili razmak točaka koji je prije ispitivanja iznosio  $L_0$ , dobiva se konačna mjerna duljina  $L_u$ , te produljenje  $\Delta L$  koje iznosi:

$$\Delta L = L_u - L_0 \quad (20)$$



Slika 51. Dijagram sila - produljenje za konstrukcijski čelik

Za uvid u stvarno ponašanje materijala mora se uzeti u obzir površina poprečnog presjeka epruvete, te se uvodi pojam naprezanja prema izrazu:

$$\sigma = \frac{F}{S_0}, \quad (21)$$

Gdje je sila  $F$  izražena u njutnima, a  $S_0$  površina poprečnog presjeka epruvete u  $mm^2$ .

U koliko se produljenje  $\Delta L$  podjeli s početnom mjernom duljinom  $L_0$  dobiva se izraz za relativno produljenje ili istežanje  $\varepsilon$  prema izrazu:



$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}, \quad \left[ \frac{mm}{mm} \right] \quad (22)$$

Nakon što se uveo pojam naprezanja iz dijagrama sila - produljenje dobiva se dijagram naprezanje - istežanje  $\sigma - \varepsilon$ , koji je kvalitativno jednak dijagramu  $F - \Delta L$  budući da se svi iznosi sile dijele s istom vrijednošću ( $S_0$ ), a sve vrijednosti produljenja s vrijednošću  $L_0$ . Dijagram naprezanje - istežanje prikazan je na slici 51., a počinje iz ishodišta pravcem koji se naziva Hookeovim pravcem i odnosi se na područje proporcionalnosti ili područje elastičnosti za koji vrijedi:

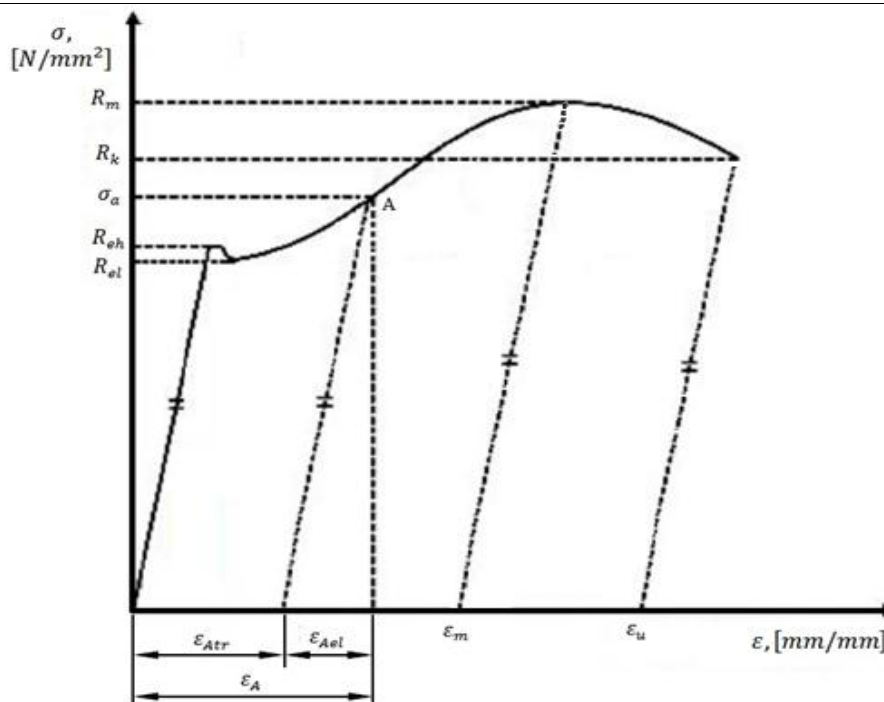
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (23)$$

Modul elastičnosti  $E$ , (Young`s modulus) je nagib krivulje u elastičnom području, a njegova je vrijednost obrnuto proporcionalna s elastičnosti materijala: što je  $E$  manji materijal je elastičniji.

**Tablica 7. Modul elastičnosti za neke materijale [31]**

| Materijal              | Modul elastičnosti $E$ , [N/mm <sup>2</sup> ] |
|------------------------|---|
| Čelik                  | 210 000                                       |
| Sivi lijev             | 100 000                                       |
| $C_u$ i $C_u$ - legure | 105 000                                       |
| $A_l$ i $A_l$ - legure | 70 000  |

U tom području naprezanja materijal je deformiran isključivo elastično što znači da u slučaju rasterećenja trajna deformacija je jednaka nuli, odnosno razmak mjernih točaka na epruveti jednak je  $L_0$ . Hookeov pravac je, uz izvjesno pojednostavljenje, s gornje strane ograničen granicom razvlačenja  $R_e$ , nakon koje se epruveta produljuje bez povećanja naprezanja.



Slika 52. Dijagram naprezanje – istezanje [32]

Granica razvlačenja je jednaka:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}, [\text{N/mm}^2], \quad (24)$$

gdje je  $F_e$  sila tečenja, a  $S_0$  površina početnog presjeka. Granicu razvlačenja karakteriziraju dvije vrijednosti (slika 52.):  $R_{eh}$  - gornja granica razvlačenja i  $R_{el}$  - donja granica razvlačenja.

Granica razvlačenja je ono naprezanje prema kojem se uz odabranu sigurnost utvrđuje dopušteno naprezanje pri radu strojnih dijelova i uređaja. Naprezanja veća od granice razvlačenja izazivaju elastične i plastične deformacije i u tom području ne vrijedi Hookov zakon. Pri naprezanju  $\sigma_a$  ukupno istezanje iznosi  $\varepsilon_A$ , a nakon rasterećenja elastična deformacija  $\varepsilon_{Ael}$  iščezava, a ostaje plastična ili trajna deformacija  $\varepsilon_{Apl}$  [32].

Vlačna čvrstoća  $R_m$  je kvocijent maksimalne sile koja je postignuta tijekom ispitivanja i početne površine poprečnog presjeka epruvete:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, [\text{N/mm}^2] \quad (25)$$

To naprezanje se ne smije zvati maksimalnim naprezanjem već vlačnom ili rasteznom čvrstoćom to je naprezanje pri maksimalnoj sili. Naime, površina presjeka epruvete od trenutka postizanja maksimalne sile počinje se naglo smanjivati pa stvarno naprezanje, unatoč

smanjenju sile, raste. Nakon dostignute vrijednosti  $R_m$  deformacija epruvete nije više jednolika po čitavoj njenoj duljini već se lokalizira na jednom mjestu, nastaje tzv. vrat. Naprezanje kod kojeg dolazi do loma epruvete naziva se konačnim naprežanjem  $R_k$  koje je jednako:

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, [\text{N/mm}^2] \quad (26)$$

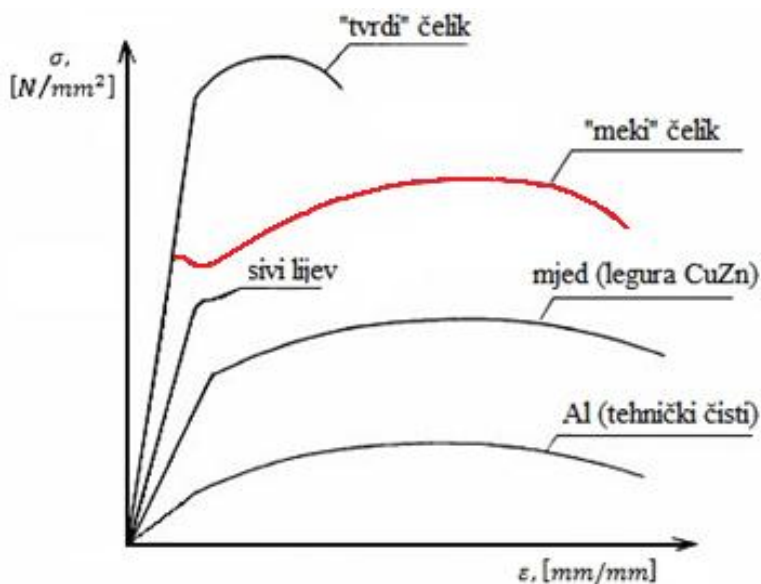
Vrijednost istezanja nakon kidanja određuje se prema izrazu:

$$\varepsilon_u = \frac{L_0 - L_u}{L_0}, [\text{mm/mm}] \quad (27)$$

Ukoliko se vrijednost  $\varepsilon_u$  izrazi u postocima naziva se istezljivost materijala  $A$ , te je definirana izrazom:

$$A = \varepsilon_u \cdot 100 \quad (28)$$

Posljedica različitih vrijednosti modula elastičnosti bit će i različiti nagibi Hooke-ovog pravca u dijagramima  $\sigma - \varepsilon$  za pojedine materijale. Kvalitativni dijagrami  $\sigma - \varepsilon$  za metalne materijale koji se najviše koriste u strojogradnji prikazani su na slici 53.



**Slika 53. Dijagram naprežanje - istezanje za neke metalne materijale [32]**

Dijagram naprežanje - istezanje kakav smo do sada prikazivali naziva se inženjerski ili konvencionalni dijagram čiji tijek kvalitativno odgovara dijagramu sila - produljenje. To, međutim nije stvarni dijagram naprežanje - istezanje, zbog toga što se iznosi naprežanja utvrđuju pomoću izraza (21) dijeljenjem sila s površine početnog presjeka epruvete, što je

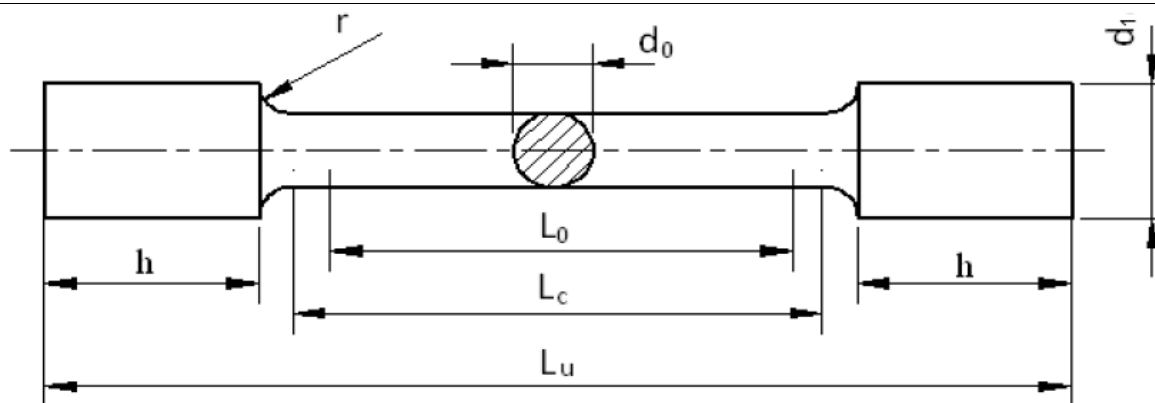
ispravno samo u području elastičnih deformacija. U području plastičnih deformacija površina poprečnog presjeka se smanjuje pa je naprezanje  $\sigma_s$  (stvarno) veće od inženjerskog. Posebno je to izraženo nakon dostizanja maksimalne sile jer se deformacija epruvete lokalizira (vrat). Inženjerski ili konvencionalni dijagram naprezanje - istezanje daje dostatne podatke za konstrukcijske svrhe, budući da se dijelovi strojeva i uređaja u eksploataciji ne opterećuju izvan elastičnog područja u kojem su oba dijagrama identična.

### 5.1.1. Epruvete za ispitivanje

Epruvete za ispitivanje izradila je tvrtka Alstom prema normi DIN 50125, sve epruvete su polirane i kvalitete površinske obrade N4. Epruvete iz brodskog lima su izrezane vodenim rezom tako da ne bi došlo do neželjene toplinske obrade materijala. Prema zahtjevima Registra sve epruvete za ispitivanje trebaju se obraditi na propisane dimenzije, te pri uzimanju uzorka za ispitivanje ili epruveta za ispitivanje treba nastojati izbjeći deformacije materijala. Ako se epruvete za ispitivanje režu toplinskim postupkom ili piljenjem s uzorka, treba predvidjeti dovoljan dodatak, koji se kasnije odstranjuje strojnom obradom. Epruvete mogu biti okruglog ili plosnatog oblika, a prednost se obično daje proporcionalnim okruglim epruvetama.

Za specificiranje ispitnih epruveta primjenjuju se slijedeće oznake (slika 54):

- $d_0$  - promjer vrata epruvete
- $d_1$  - promjer glave
- $h$  - duljina glave
- $L_0$  - početna mjerna duljina
- $L_c$  - duljina ispitnog dijela
- $L_u$  - ukupna duljina epruvete
- $S_0$  - početna površina presjeka
- $r$  - prijelazni polumjer



Slika 54. Karakteristične veličine okrugle epruvete [33]

Prvenstveno treba primjenjivati kratke proporcionalne epruvete, s početnom mjernom duljinom od  $L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$ , jer se zahtjevi za veličinom produljenja u Pravilima Registra odnose na tu mjernu duljinu [33]. Preporučene vrijednosti proporcionalnih okruglih epruveta prema Registru dane su u tablici

Tablica 8. Preporučene dimenzije epruveta prema Registru

| Veličina       | $d_0$ | $L_0$ | $L_c$ | $r$ |
|----------------|-------|-------|-------|-----|
| Dimenzija [mm] | 14    | 70    | 85    | 10  |

Pošto ispitni uređaj na kojem će se vršiti ispitivanja može postići maksimalnu silu od  $F = 50$  kN smanjen je promjer epruvete, prema zahtjevima Registra. U tablici 9 dane su dimenzije po kojima su izrađene epruvete za ispitivanje.

Tablica 9. Dimenzije za izradu epruveta

| Veličina      | $d_0$ | $d_1$ | $L_0$ | $L_c$ | $L_u$ | $r$ | $h$ |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|
| Dimenzija[mm] | 8     | 10    | 40    | 48    | 115   | 10  | 30  |

Prije početka eksperimenta epruvete su izmjerene te su određene sve dimenzije relevantne za ispitivanje statičkim vlačnim pokusom. Pomičnim mjerilom su određeni promjeri vrata epruveta jer je njima definirana površina poprečnog presjeka epruvete koja je uz silu opterećenja najbitnija veličina za određivanje naprezanja. U tablici 10 dane su dimenzije promjera epruvete te površina poprečnih presjeka. Promjeri vrata epruvete na svakoj epruveti su mjereni na tri različita mjesta te je uzeta prosječna vrijednost. Epruvete korištene za statički vlačni pokus i za dinamička ispitivanja prikazane su na slici 55.

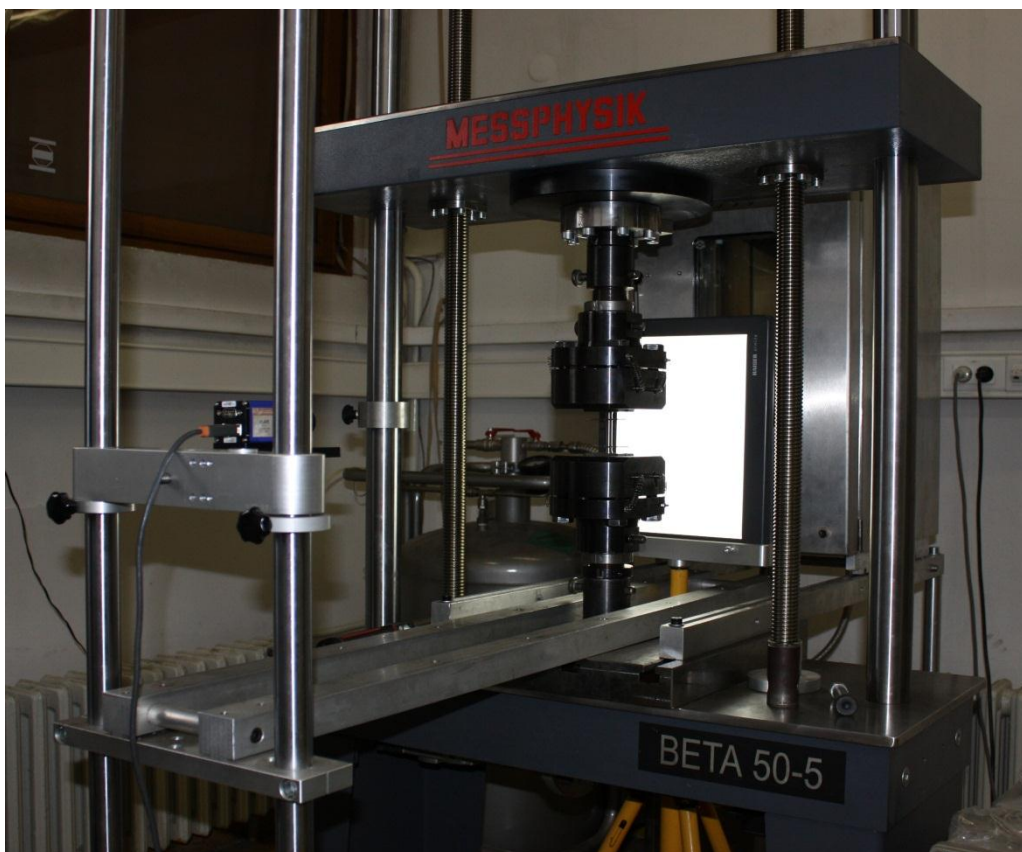
**Tablica 10. Promjeri i površine poprečnih presjeka epruveta**

| Br. | Oznaka epruvete | Promjer [mm] |         |       |          | Površina [ $mm^2$ ] |
|-----|-----------------|--------------|---------|-------|----------|---------------------|
|     |                 | gornji       | srednji | donji | prosjeck |                     |
| 1   | E_1             | 8,13         | 8,14    | 8,11  | 8,126    | 51,861              |
| 2   | E_2             | 7,99         | 8,01    | 8,02  | 8,007    | 50,353              |
| 3   | E_3             | 8,10         | 8,12    | 8,15  | 8,123    | 51,823              |

**Slika 55. Epruvete korištene za provedbu eksperimenta**

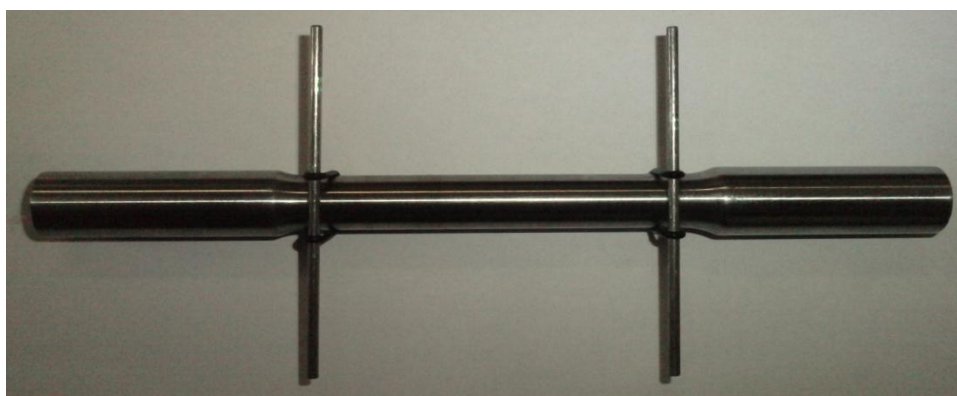
### 5.1.2. Provedba statičkog vlačnog pokusa

Ispitivanja su provedena na statičkoj kidalici Messphysik Beta 50-5 s maksimalnom silom opterećenja od 50kN (slika 56). Ispitivanje se provodi brzinom od 5 mm/min. Pomak čeljusti kidalice se ostvaruje pomoću dva vretena. Prije početka ispitivanja u programskom sučelju kidalice podešavaju se i unose svi potrebni parametri poput brzine ispitivanja, poprečnog presjeka epruvete, vrste ispitivanja. Za potrebe ispitivanja koristile su se tri epruvete slika 55.

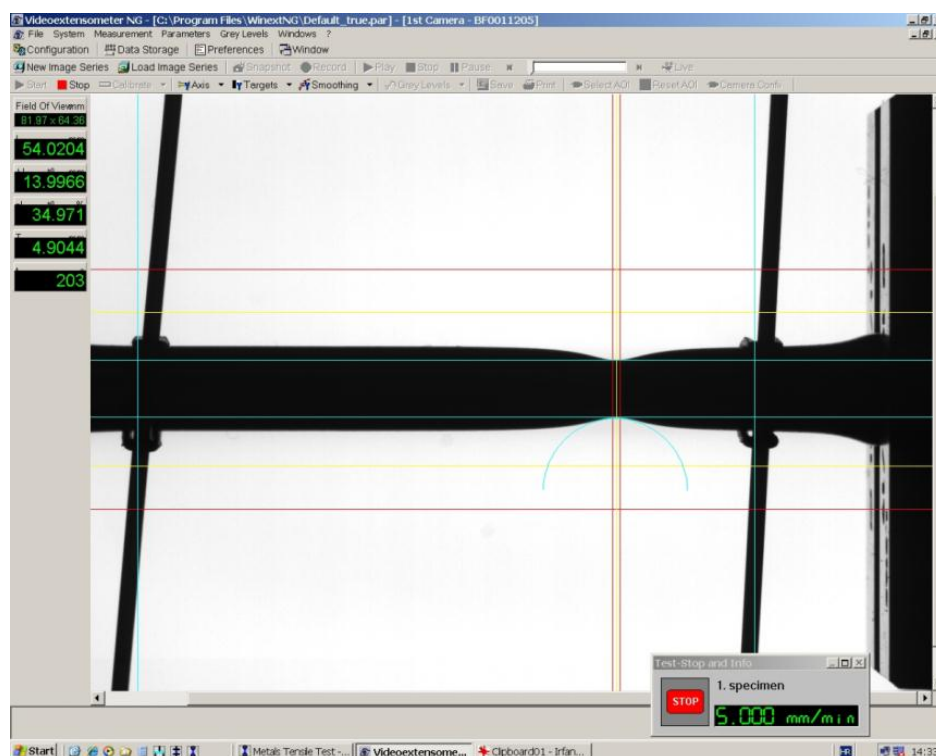


Slika 56. Statička kidalica Messphysik Beta 50-5

Prilikom određivanja mehaničkih svojstava materijala potrebno je koristiti precizne mjerne uređaje i instrumente. Naprezanje i istezanje su dva glavna parametra iz kojih se računa većina mehaničkih svojstava tijekom jednoosnog testiranja. Istezanje i poprečni presjek epruvete mjeri se pomoću ekstenzometra. Za potrebe ispitivanja koristio se videoekstenzometar. To je optički mjerni uređaj koji pomoću jedne kamere "prati" deformacije epruvete. Istezanje se izračunava se iz relativnog pomaka dviju odabranih točaka na epruveti (slika 57). Program Videoextenziometar NG obrađuje prikupljene podatke te navodi ekstenzometar da optički traži najuži presjek epruvete (slika 58) na temelju kojeg se kasnije i može generirati i stvarni dijagram naprezanje - istezanje.



Slika 57. Markeri postavljeni na epruvetu

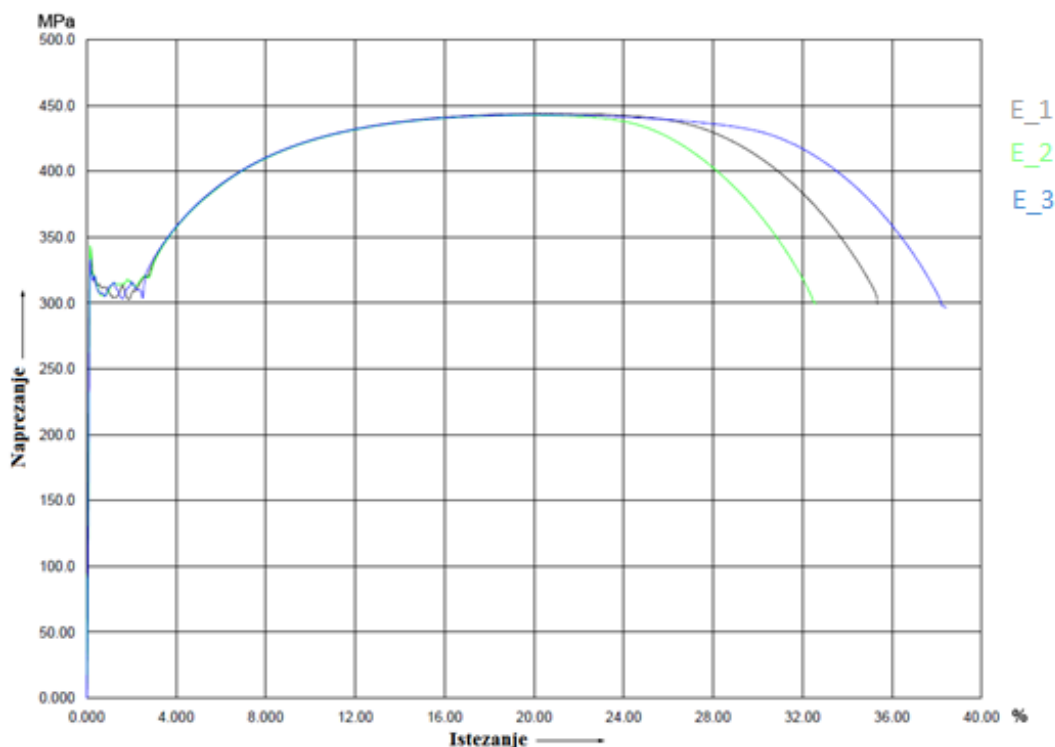


Slika 58. Programsko sučelje: Videoextensometar NG



### 5.1.3. Rezultati statičkog vlačnog pokusa

U ovom poglavlju dani su rezultati ispitivanja statičkog vlačnog pokusa sa pripadajućim dijagramima. Ispitivanja su se provodila na sobnoj temperaturi 22°. Rezultati su prikazani dijagramom naprezanje - istezanje na slici 59 i tablicom 11.



Slika 59. Dijagram naprezanje - istezanje

Tablica 11. Rezultati ispitivanja statičkog vlačnog pokusa

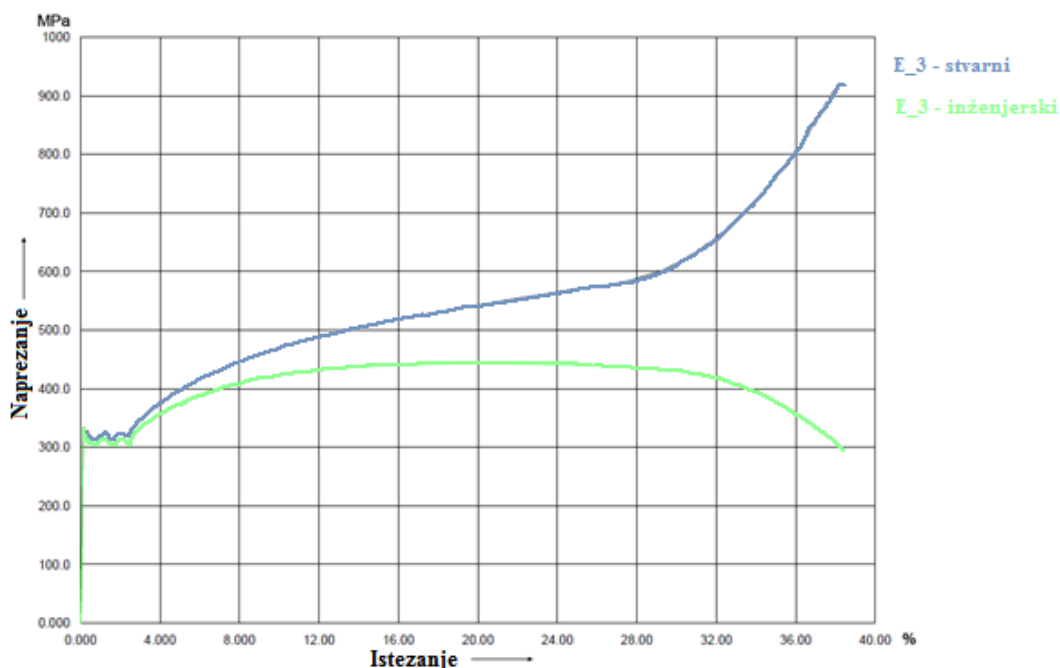
| Oznaka epruvete | $d_0$ [mm] | $S_0$ [mm] | E [MPa] | $R_{eL}$ [MPa] | $R_m$ [MPa] | $\varepsilon_m$ [%] | $\varepsilon_u$ [%] |
|-----------------|------------|------------|---------|----------------|-------------|---------------------|---------------------|
| E_1             | 8,126      | 51,861     | 215,8   | 320,4          | 444,0       | 20,79               | 35,34               |
| E_2             | 8,007      | 50,353     | 206,7   | 320,0          | 442,6       | 19,92               | 32,57               |
| E_3             | 8,123      | 51,823     | 201,3   | 318,8          | 443,1       | 19,86               | 38,43               |
| Sr. vrijednost  | 8,085      | 51,34      | 207,9   | 319,7          | 443,2       | 20,19               | 35,45               |
| St. odstupanje  | 0,068      | 0,0860     | 7,328   | 0,833          | 0,709       | 2,931               | 0,520               |

Može se uočiti vrlo malo rasipanje rezultata odnosno vrlo dobro poklapanje krivulja za sve tri epruvete. Brodski lim po rezultatima ispitivanja spada u grupu "mekih čelika". Ima izraženu granicu tečenja što je vidljivo i na slici 59. Kod epruvete E\_3 vrat je nastao točno na sredini epruvete (slika 60) pa su i mjerenja istezljivosti na toj epruveti i najvjerodostojnija. U tablici 11 možemo uočiti da su vrijednosti modula elastičnosti, vlačne čvrstoće i granice tečenja vrlo ujednačene te možemo zaključiti da materijal ima ujednačena svojstva.



Slika 60. Epruvete nakon ispitivanja

Kako je već ranije spomenuto inženjerski dijagram naprezanje - istezanje, nije "stvarni" zbog toga što se iznosi naprezanja utvrđuju pomoću izraza (21) dijeljenjem sila s površinom početnog presjeka epruvete, što je ispravno samo u području elastičnih deformacija. Na slici 61 dan je stvarni dijagram naprezanje - istezanje za epruvetu E\_3 koji uzima u obzir stvarnu površinu poprečnog presjeka epruvete.



Slika 61. Stvarni dijagram naprezanje - istezanje

Na temelju eksperimentalno dobivenih podataka o vlačnoj čvrstoći testiranog brodskog lima uzima se za početni iznos osnovne amplitude naprezanja ciklusa uzima:

$$\sigma_o = 0,6 \cdot R_m = 0,6 \cdot 443,42 \approx 266 \text{ N/mm}^2 \quad (29)$$

## 6. PROVEDBA DINAMIČKIH ISPITIVANJA

### 6.1. Određivanje amplitude naprezanja u spektru opterećenja

Dinamička čvrstoća materijala određuje se eksperimentalno, na uređajima koji se nazivaju umaralice. Korištena je servohidraulička kidalica W+B LFV 50-HH sa upravljačkom jedinicom DIGWIN 2000 Švicarskog proizvođača Walter Bai (slika63). Prije ispitivanja u upravljački program umaralice Dion-Pro unose se parametri ispitivanja, odnosno oblik i visina opterećenja te frekvencija. Za oblik opterećenja odabran je sinusoidni oblik pri kojem naprezanje  $\sigma$  mijenja za amplitudu  $\sigma_a$  između vrijednosti  $\sigma_{min}$  i  $\sigma_{max}$  uz pripadajuće srednje naprezanje  $\sigma_m$ .



Slika 62. Servohidraulička umaralica LFV 50-HH s upravljačkom jedinicom

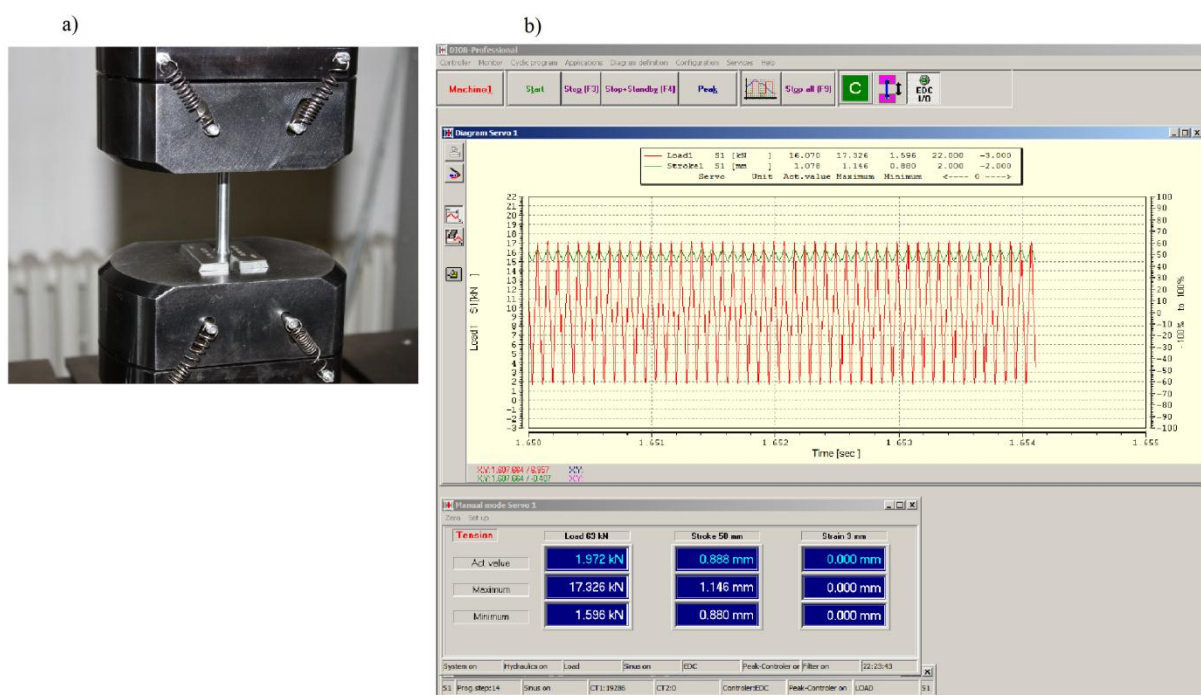
Prije početka ispitivanja svaka epruveta je mjerena na tri različita dijela presjeka te se za izračunavanje sile uzimala srednja vrijednost. Sva mjerenja i ispitivanja provedena su na sobnoj temperaturi 22°C.

U upravljačkom programu umaralice potrebno je generirati programski kod prema kojem će se opterećivati ispitni uzorci. Kao što je već rečeno za oblik opterećenja odabran je sinusoidni oblik. Osim visine opterećenja i frekvencije u upravljačkom sučelju se prati i pomak gornje

čeljusti umaralice, odnosno produljenje epruvete. Pomak gornje čeljusti moguće je pratiti na dva načina:

- 1.) Kod opterećivanja konstantnom amplitudom moguće je praćenje vršnih vrijednosti pomaka gornje čeljusti umaralice.
- 2.) Kod opterećivanja varijabilnom amplitudom softversko ograničenje onemogućava mjerenje vršnih vrijednosti pomaka. Kod takvog načina opterećenja mjerenje pomaka se zadaje u nekom vremenskom intervalu u kojem će program zapisivati podatke o pomaku u tom vremenskom intervalu.

Na slici 63 a. prikazana je epruveta za vrijeme dinamičkog ispitivanja a na 63 b. je sučelje upravljačkog programa umaralice Dion – Pro. Crvena linija prikazuje amplitudu opterećenja dok zelena bilježi pomak gornje čeljusti umaralice.



Slika 63. Prikaz epruvete u čeljusti umaralice zajedno sa upravljačkim sučeljem

### 6.1.1. Određivanje osnovne amplitude ciklusa naprezanja

Na temelju eksperimentalno dobivenih podataka o iznosu vlačne čvrstoće materijala  $R_m = 443,42 \text{ N/mm}^2$  iz statičkog vlačnog pokusa uzima se kako je već rečeno za početni iznos osnovne amplitude naprezanja:

$$\sigma_o = 0,60 \cdot R_m = 0,60 \cdot 443,42 \approx 266 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2},$$

odabrano:

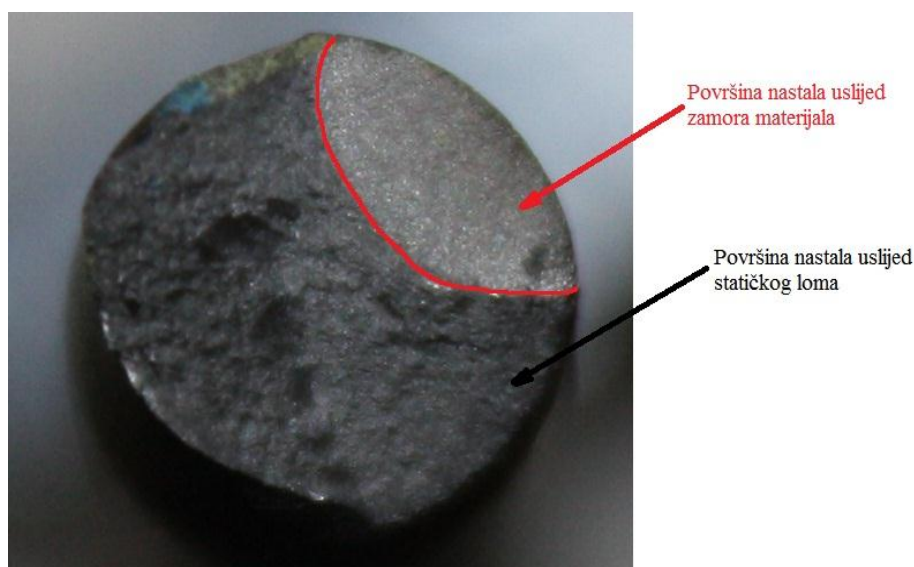
$$\sigma_o = 260 \frac{N}{mm^2},$$

U tablici 12 navedeni su podaci za epruvete E\_4 do E\_6 te pripadajuće sile i naprezanja koja su se primjenjivala u tijeku eksperimenta. Kod epruvete E\_4 uzeto je  $\sigma_{max} = 260 \text{ N/mm}^2$  uz koje epruveta nije doživjela lom nakon  $< 1.6 \cdot 10^6$  ciklusa, što izlazi izvan predviđenog vremenskog ograničenja trajanja ispitivanja. Kod epruvete E\_5 naprezanje je podignuto na  $\sigma_{max} = 300 \text{ N/mm}^2$  kod kojeg do loma također nije došlo nakon predviđenog vremenskog trajanja ispitivanja.

**Tablica 12. Parametri za određivanje osnovne amplitude**

| Br. | $d_{sr}$ | Površina        | $\sigma_m$        | r   | $\sigma_{max}$    | $\sigma_{min}$    | $\sigma_a$        | $F_m$   | $F_{max}$ | $F_{min}$ | f  | ciklusa<br>do loma |
|-----|----------|-----------------|-------------------|-----|-------------------|-------------------|-------------------|---------|-----------|-----------|----|--------------------|
|     | mm       | mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | /   | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | N       | N         | N         | Hz |                    |
| E_4 | 7.95     | 49.61           | 143               | 0.1 | 260.00            | 26.00             | 117.00            | 7094.80 | 12899.63  | 1289.96   | 15 | $< 1.6 \cdot 10^6$ |
| E_5 | 8.01     | 50.37           | 165               | 0.1 | 300.00            | 30.00             | 135.00            | 8310.34 | 15109.70  | 1510.97   | 12 | $< 1.3 \cdot 10^6$ |
| E_6 | 8.015    | 50.43           | 187               | 0.1 | 340.00            | 34.00             | 153.00            | 9430.14 | 17145.72  | 1714.57   | 10 | 373561             |

Kod epruvete E\_6 uzeto je naprezanje  $\sigma_{max} = 340 \text{ N/mm}^2$  i koeficijent asimetrije ciklusa  $r=1$  uz frekvenciju od 12 Hz zamorni lom epruvete nastupio je nakon 373 561 ciklusa. Primijenjeno opterećenje prelazi granicu elastičnosti materijala, te se ulazi u plastično područje (niskociklički zamor) te je uzeto kao referentno zbog prihvatljivog vremenskog trajanja ispitivanja po ispitnom uzorku. Na slici 64 prikazana je lomna površina epruvete E\_6 na kojoj se može razlikovati površina koja je nastala uslijed zamora materijala te površina nastala uslijed statičkog loma.



**Slika 64. Površina loma uslijed zamora epruvete E\_6**



Na temelju toga odabrane su slijedeće vrijednosti osnovnog spektra opterećenja:

**Tablica 13. Vrijednosti osnovne amplitude opterećenja**

| Simbol     | $\sigma_{max} \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$ | $\sigma_{min} \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$ | $\sigma_m \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$ | $2\sigma_a \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$ | $r$ | $f$ |
|------------|--|--|--|---|-----|-----|
| Vrijednost | 340  | 34   | 187                                      | 234                                       | 0,1 | 12  |

### 6.1.2. Definiranje parametara spektra opterećenja

Na temelju podataka o pojavljivanju valova određenih visina s pripadajućim brojem ciklusa kreirani su Spektar I i Spektar II. Broj pojavljivanja valnih visina uvećan je pet puta kako bi se dobili spektri sa 500 000 ciklusa.

**I Spektar** - amplituda raste od najmanje do najveće vrijednosti unutar spektra, te se nastavlja opterećivati osnovnom amplitudom do konačnog loma.

**Tablica 14. Parametri za Spektar I**

| $i$                 | $H_s$ | $H_{s_i}/H_{s_{max}}$ | $N_i$   | $\sigma_{a_i}$ | $f_i$ | $\sigma_m$ | $\sigma_{max_i}$ | $\sigma_{min_i}$ |
|---------------------|-------|-----------------------|---------|----------------|-------|------------|------------------|------------------|
|                     | $m$   |                       | $N$     | $N/mm^2$       | $H_z$ | $N/mm^2$   | $N/mm^2$         | $N/mm^2$         |
| 1                   | 0,5   | 0,0303                | 15250   | 7,06           | 15    | 187        | 194,06           | 179,94           |
| 2                   | 1,5   | 0,0909                | 112875  | 21,18          | 20    | 187        | 208,18           | 165,82           |
| 3                   | 2,5   | 0,1515                | 119050  | 35,30          | 20    | 187        | 222,30           | 151,70           |
| 4                   | 3,5   | 0,2121                | 95640   | 49,42          | 20    | 187        | 236,42           | 137,58           |
| 5                   | 4,5   | 0,2727                | 66445   | 63,55          | 15    | 187        | 250,55           | 123,45           |
| 6                   | 5,5   | 0,3333                | 41640   | 77,67          | 15    | 187        | 264,67           | 109,33           |
| 7                   | 6,5   | 0,3939                | 24030   | 91,79          | 15    | 187        | 278,79           | 95,21            |
| 8                   | 7,5   | 0,4545                | 12930   | 105,91         | 15    | 187        | 292,91           | 81,09            |
| 9                   | 8,5   | 0,5152                | 6545    | 120,03         | 15    | 187        | 307,03           | 66,97            |
| 10                  | 9,5   | 0,5758                | 3130    | 134,15         | 5     | 187        | 321,15           | 52,85            |
| 11                  | 10,5  | 0,6364                | 1425    | 148,27         | 5     | 187        | 335,27           | 38,73            |
| 12                  | 11,5  | 0,6970                | 620     | 162,39         | 5     | 187        | 349,39           | 24,61            |
| 13                  | 12,5  | 0,7576                | 255     | 176,52         | 5     | 187        | 363,52           | 10,48            |
| 14                  | 13,5  | 0,8182                | 105     | 190,64         | 5     | 187        | 377,64           | -3,64            |
| 15                  | 14,5  | 0,8788                | 40      | 204,76         | 1     | 187        | 391,76           | -17,76           |
| 16                  | 15,5  | 0,9394                | 15      | 218,88         | 1     | 187        | 405,88           | -31,88           |
| 17                  | 16,5  | 1,0000                | 5       | 233,00         | 1     | 187        | 420,00           | -46,00           |
|                     |       |                       | 500000  |                |       |            |                  |                  |
| Osnovno opterećenje |       |                       | do loma | 153,00         | 12    | 187        | 340,00           | 34,00            |

U tablici 14 prikazani su parametri opterećenja za Spektar I, nakon 500000 ciklusa opterećivanje epruvete do loma nastavlja se osnovnom amplitudom opterećenja. Iz tablice je vidljivo da su naprezanja u koracima  $\sigma_i, N_i$  od 1-9 u elastičnom području,  $\sigma_{max} < R_e$ , u kojem se epruveta opteretila 385 035 ciklusa. U koracima od 10 - 17 naprezanja su bila u

plastičnom području  $\sigma_{max} > R_e$  (niskociklički zamor), u kojemu se epruveta opteretila 114 965 ciklusa.

**II Spektar** - amplituda naprezanja pada od najveće do najmanje vrijednosti unutar spektra, te se nastavlja opterećivati osnovnom amplitudom do konačnog loma

**Tablica 15. Parametri za Spektar II**

| $i$                 | $H_s$ | $H_{s_i}/H_{s_{max}}$ | $N_i$   | $\sigma_{a_i}$ | $f_i$ | $\sigma_m$ | $\sigma_{max_i}$ | $\sigma_{min_i}$ |
|---------------------|-------|-----------------------|---------|----------------|-------|------------|------------------|------------------|
|                     | $m$   |                       | $N$     | $N/mm^2$       | $H_z$ | $N/mm^2$   | $N/mm^2$         | $N/mm^2$         |
| 1                   | 16,5  | 1,0000                | 5       | 233,00         | 1     | 187        | 420,00           | -46,00           |
| 2                   | 15,5  | 0,9394                | 15      | 218,88         | 1     | 187        | 405,88           | -31,88           |
| 3                   | 14,5  | 0,8788                | 40      | 204,76         | 1     | 187        | 391,76           | -17,76           |
| 4                   | 13,5  | 0,8182                | 105     | 190,64         | 5     | 187        | 377,64           | -3,64            |
| 5                   | 12,5  | 0,7576                | 255     | 176,52         | 5     | 187        | 363,52           | 10,48            |
| 6                   | 11,5  | 0,6970                | 620     | 162,39         | 5     | 187        | 349,39           | 24,61            |
| 7                   | 10,5  | 0,6364                | 1425    | 148,27         | 5     | 187        | 335,27           | 38,73            |
| 8                   | 9,5   | 0,5758                | 3130    | 134,15         | 5     | 187        | 321,15           | 52,85            |
| 9                   | 8,5   | 0,5152                | 6545    | 120,03         | 15    | 187        | 307,03           | 66,97            |
| 10                  | 7,5   | 0,4545                | 12930   | 105,91         | 15    | 187        | 292,91           | 81,09            |
| 11                  | 6,5   | 0,3939                | 15250   | 91,79          | 15    | 187        | 278,79           | 95,21            |
| 12                  | 5,5   | 0,3333                | 24030   | 77,67          | 15    | 187        | 264,67           | 109,33           |
| 13                  | 4,5   | 0,2727                | 41640   | 63,55          | 15    | 187        | 250,55           | 123,45           |
| 14                  | 3,5   | 0,2121                | 66445   | 49,42          | 15    | 187        | 236,42           | 137,58           |
| 15                  | 2,5   | 0,1515                | 95640   | 35,30          | 20    | 187        | 222,30           | 151,70           |
| 16                  | 1,5   | 0,0909                | 112875  | 21,18          | 20    | 187        | 208,18           | 165,82           |
| 17                  | 0,5   | 0,0303                | 119050  | 7,06           | 20    | 187        | 194,06           | 179,94           |
|                     |       |                       | 500000  |                |       |            |                  |                  |
| Osnovno opterećenje |       |                       | do loma | 153,00         | 12    | 187        | 340,00           | 34,00            |

U tablici 15 prikazani su parametri opterećenja za Spektar II, nakon 500000 ciklusa opterećivanje epruvete do loma nastavlja se osnovnom amplitudom opterećenja. Iz tablice je vidljivo da su naprezanja u koracima  $\sigma_i, N_i$  od 1-7 u plastičnom području,  $\sigma_{max} > R_e$  (niskociklički zamor), u kojem se epruveta opteretila 114969 ciklusa. U koracima od 8 - 17 naprezanja su bila u elastičnom području  $\sigma_{max} < R_e$ , u kojemu se epruveta opteretila 385035 ciklusa.

Može se primijetiti da je za srednju vrijednost naprezanja  $\sigma_m$ , kod spektra I i spektra II uzeta vrijednost srednjeg naprezanja osnovne amplitude opterećenja. U tablici 14 i 15 vidimo da su pojedina minimalna naprezanja u spektru negativna, što znači da je epruveta bila opterećena i na tlak.

Zbog relativno malog promjera epruvete  $d_0 = 8$  mm i duljine  $L_0 = 40$  mm treba paziti da iznos tlačne sile ne bi bio previsok kako ne bi došlo do izvijanja epruvete. Na slici

65 prikazana je epruveta na kojoj se pogreškom primijenila vrlo visoka tlačna sila te je došlo do potpunog savijanja. Na temelju toga što nije došlo do loma epruvete možemo zaključiti da je materijal vrlo duktilan.



**Slika 65. Epruveta opterećena velikom tlačnom silom**



## 7. REZULTATI DINAMIČKIH ISPITIVANJA

U ovom poglavlju dani su rezultati dinamičkih ispitivanja te su prikazani pripadajući dijagrami. Ispitivanja su se provodila na sobnoj temperaturi te su se za svaki spektar koristila po tri ispitna uzorka.

Nakon rezultata svih mjerenja dan je preklapni dijagram s krivuljama ispitivanja karakterističnih epruveta za Spektar I i Spektar II kako bi se i vizualno mogli usporediti rezultati. Za svako ispitivanje dana je i tablica u kojoj se nalaze relevantni rezultati ispitivanja za svaku pojedinu epruvetu.

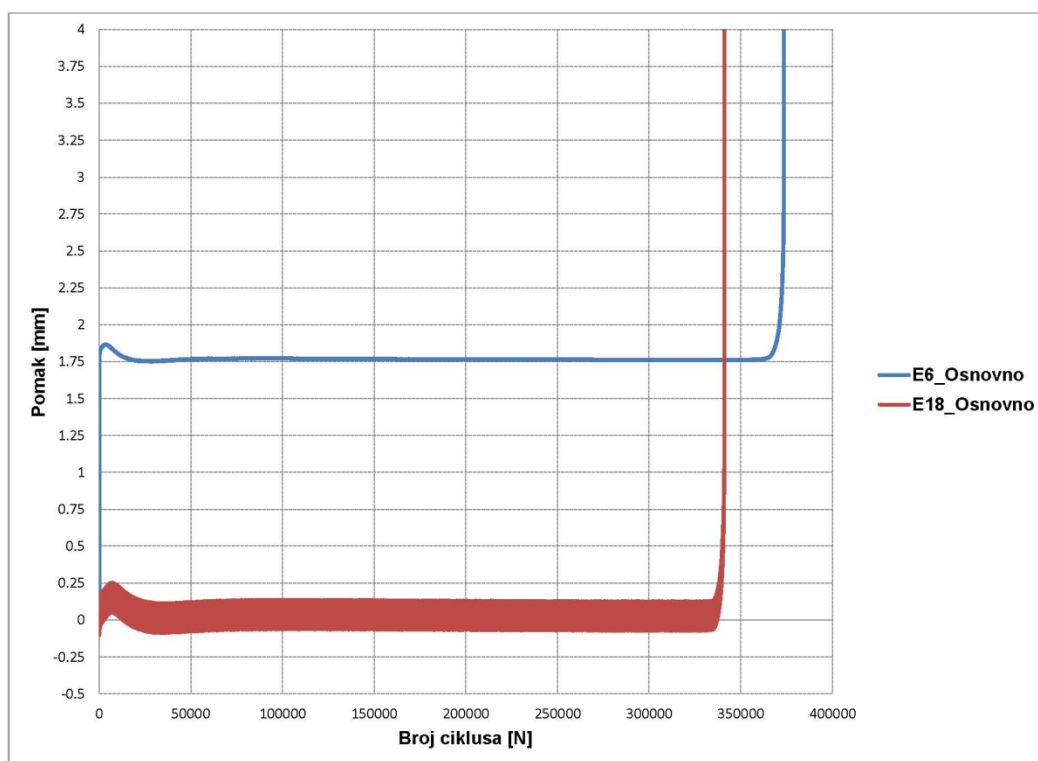
Na kraju je napravljen i statički vlačni pokus na epruvetama E\_4 i E\_19, koje su ranije već bile korištene u dinamičkim ispitivanjima. Prikazani su i usporedni dijagrami statičkog vlačnog pokusa epruveta koje nisu bile dinamički opterećene, s epruvetama koje smo najprije dinamički opteretili (E\_4 i E\_19) a potom smo na njima proveli statički vlačni pokus.

### 7.1. Rezultati za osnovni spektar

Tablica 16. Rezultati ispitivanja za osnovni spektar

| Br.                | Vrsta opterećenja | $\sigma_m$        | $\sigma_{max}$    | $\sigma_{min}$    | Broj ciklusa<br>do loma |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
|                    |                   | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> |                         |
| E_6                | Osnovno           | 187               | 340.00            | 34.00             | 372561                  |
| E_9                | Osnovno           | 187               | 340.00            | 34.00             | 379342                  |
| E_18               | Osnovno           | 187               | 340.00            | 34.00             | 341148                  |
| Srednja vrijednost |                   |                   |                   |                   | 364350                  |

U tablici 16 prikazani su rezultati brojeva ciklusa do loma pri opterećenju osnovnim spektrom. Vidimo da postoji relativno malo rasipanje rezultata između ispitnih uzoraka, s obzirom da se radi o dinamičkim ispitivanjima. Sa srednjom vrijednošću od 364350 ciklusa koliko su prosječno izdržale epruvete do loma moći ćemo kasnije usporediti rezultate sa spektrom I i spektrom II. Prilikom provedbe eksperimenta za mjerenje produljenja epruvete nije se koristio video ekstenzometar, nego su se podaci očitavali s dinamičke kidalice. Zbog toga se podaci mogu koristiti samo u kvalitativne svrhe, međutim dobro su poslužili za izradu dijagrama u kojem je prikazana ovisnost pomaka gornje čeljusti kidalice o broju ciklusa.



**Slika 66. Osnovno opterećenje: maksimalan pomak - broj ciklusa**

Slika 64. Prikazuje ovisnost pomaka gornje čeljusti u odnosu na broj ciklusa epruvete E\_6 i E\_18. Razlika u vrijednostima nastala je zbog urezivanja čeljusti u tijelo epruvete. Dok su kod epruvete E\_6 uzimane samo vršne vrijednosti pomaka, kod epruvete E\_18 su uzimane vrijednosti i u vremenskom intervalu od jedne milisekunde, te se u tom slučaju ne može osigurati uzimanje samo vršnih vrijednosti. Ovakav način akvizicije podataka jedini je moguć kod opterećenja s različitim amplitudama, zbog ograničenja softverskog paketa, kakav je zadan u Spektu I i Spektu II.

Može se primijetiti da epruveta kod osnovnog opterećenja zadržava konstantno produljenje sve do loma. Pomak gornje čeljusti je nuliran u trenutku kada je opterećenje doseglo srednju vrijednost  $\sigma_m = 187 \text{ N/mm}^2$ .

**7.2. Rezultati za spektar I****Tablica 17. Rezultati ispitivanja za Spektar I**

| Br. epruvete       | Vrsta opterećenja | $\sigma_m$        | $\sigma_{max}$    | $\sigma_{min}$    | Broj ciklusa do loma |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
|                    |                   | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> |                      |
| E_8                | Spektar I         | 187               | 420.00            | -46.00            | 668317               |
| E_13               | Spektar I         | 187               | 420.00            | -46.00            | 733909               |
| E_10               | Spektar I         | 187               | 420.00            | -46.00            | 566901               |
| Srednja vrijednost |                   |                   |                   |                   | 656376               |

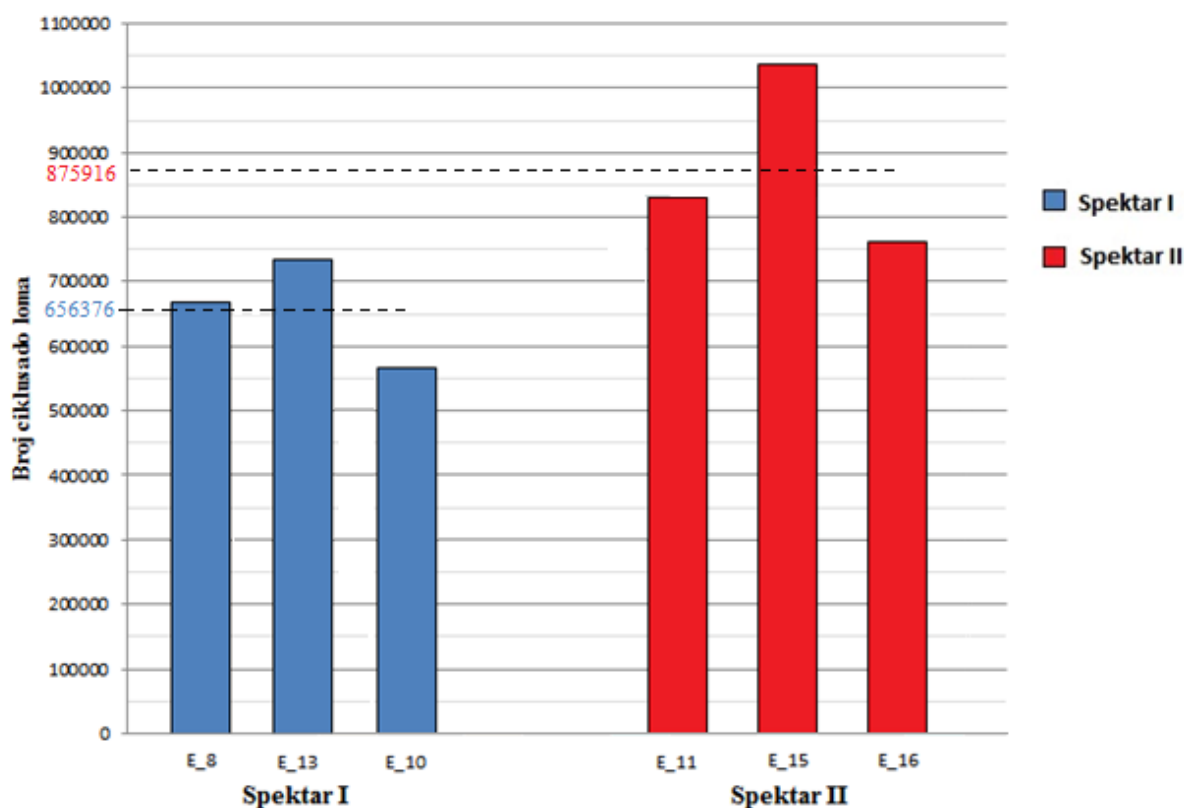
U tablici 17 prikazani su rezultati brojeva ciklusa do loma pri opterećivanju Spektrom I. Vidimo da su rezultati ispitivanja prihvatljivog rasipanja s obzirom da se kod dinamičkih ispitivanja mogu očekivati i znatnija odstupanja. Vidljivo je da su epruvete do loma izdržale prosječno 656376 ciklusa, što znači da su nakon opterećivanja spektrom I epruvete izdržale još oko 40% osnovnog opterećenja.

**7.3. Rezultati za spektar II****Tablica 18. Rezultati ispitivanja za Spektar II**

| Br. epruvete       | Vrsta opterećenja | $\sigma_m$        | $\sigma_{max}$    | $\sigma_{min}$    | Broj ciklusa do loma |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
|                    |                   | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> |                      |
| E_11               | Spektar II        | 187               | 420.00            | -46.00            | 829867               |
| E_15               | Spektar II        | 187               | 420.00            | -46.00            | 1036254              |
| E_16               | Spektar II        | 187               | 420.00            | -46.00            | 761626               |
| Srednja vrijednost |                   |                   |                   |                   | 875916               |

U tablici 18 prikazani su rezultati brojeva ciklusa do loma pri opterećivanju Spektrom I. Vidimo da su rezultati ispitivanja prihvatljivog rasipanja s obzirom da se kod dinamičkih ispitivanja mogu očekivati i znatnija odstupanja. Epruvete do loma pri opterećivanju Spektrom II izdržale su prosječno 875916 ciklusa, što znači da su nakon opterećivanja Spektrom II epruvete izdržale preko 100% osnovnog opterećenja.

#### 7.4. Usporedba rezultata



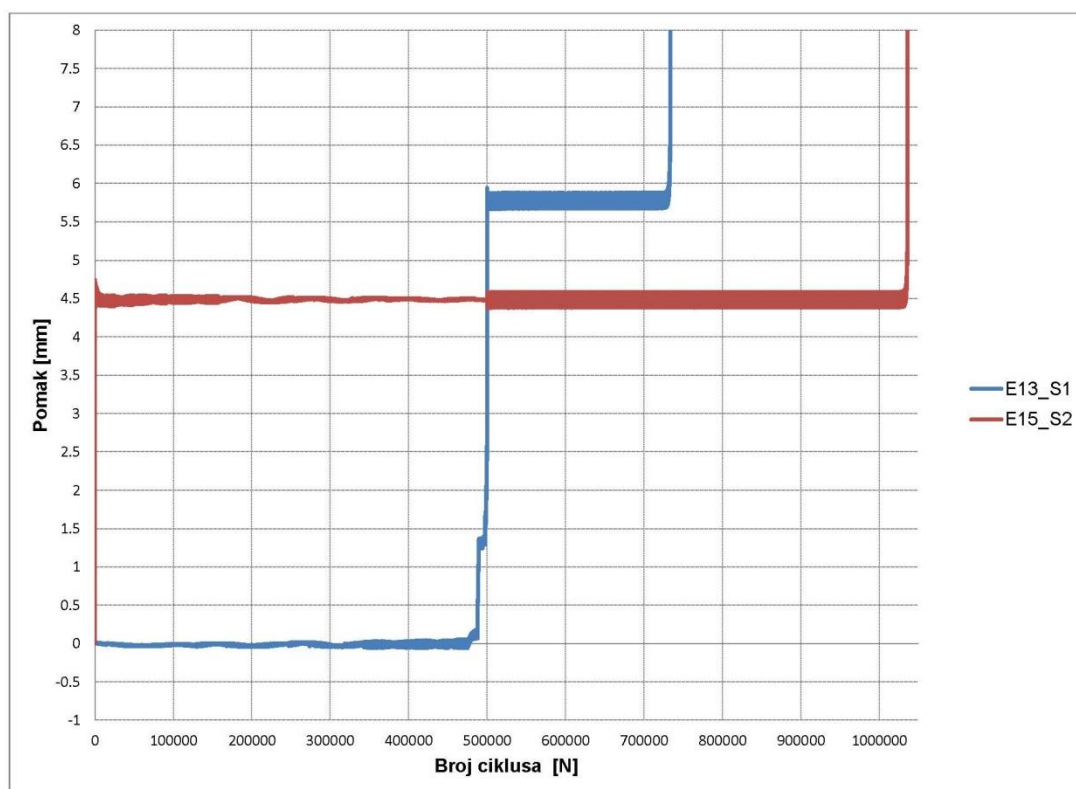
Slika 67. Usporedba broja ciklusa do loma

Na slici 65 prikazani su usporedni rezultati trajanja ciklusa za Spektr I i Spektr II. Iz slike je vidljivo da su pri opterećivanju Spektrom II sve tri epruvete izdržale veći broj ciklusa, te su pokazale višu dinamičku izdržljivost. Kada usporedimo srednju vrijednost (Tablica 19) vidimo da je su epruvete koje smo opteretili sa Spektrom II izdržale prosječno 200000 ciklusa više nego one koje smo opteretili Spektrom I.

Tablica 19. Prosječan broj ciklusa do loma

| Prosječan broj ciklusa do loma | Spektr I | Spektr II | Osnovno opterećenje |
|--------------------------------|----------|-----------|---------------------|
|                                | 656376   | 875916    | 364350              |

Na slici 66 prikazan je zajednički dijagram: maksimalni pomak - broj ciklusa za epruvete E\_13 i E\_15.



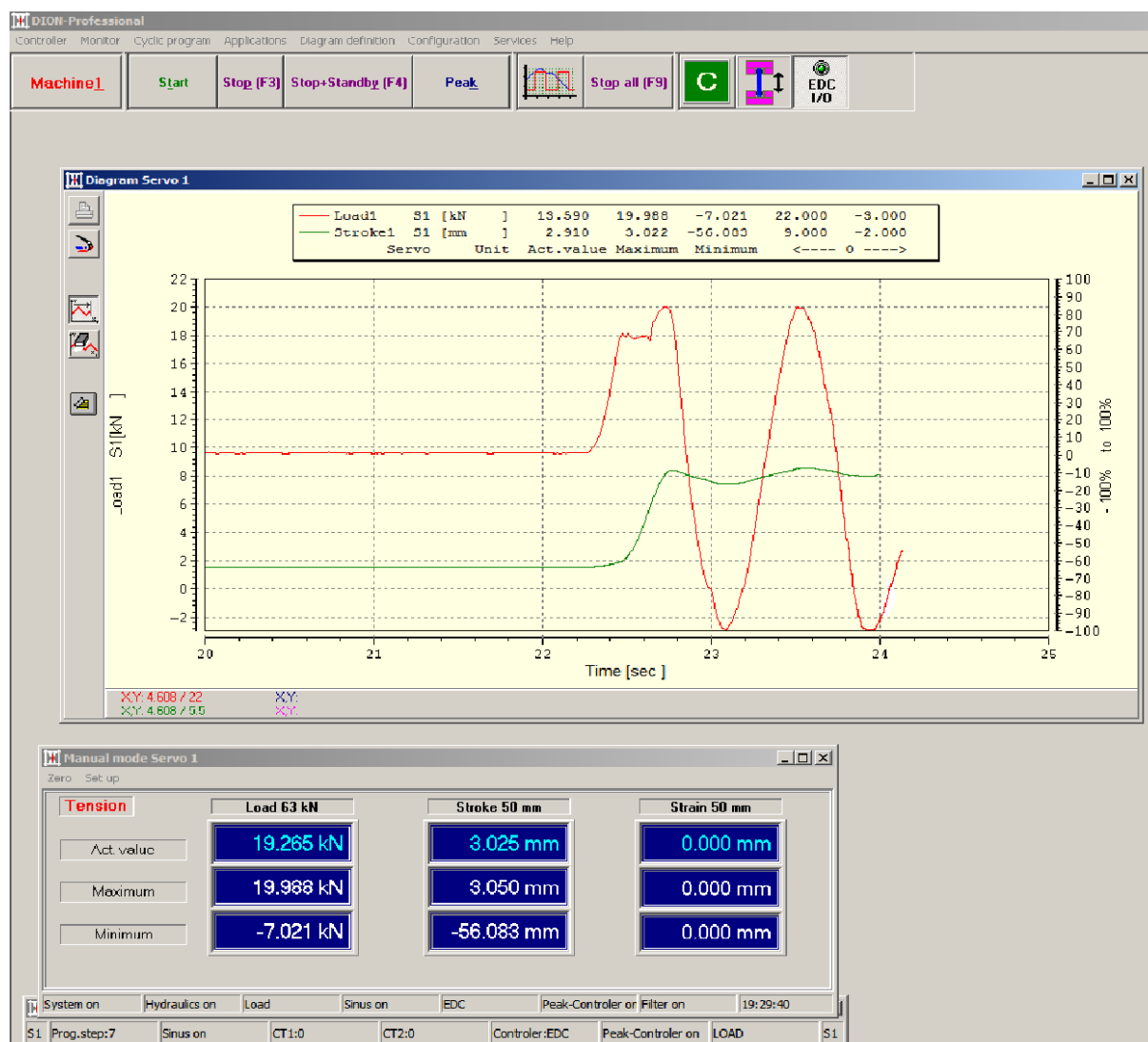
**Slika 68. Usporedni dijagram: maksimalni pomak - broj ciklusa**

Iz dijagrama je vidljivo da se kod opterećenja spektrom I, produljenje epruvete počinje zamjećivati nakon  $\sim 450\,000$  ciklusa, nakon čega u zadnjim ciklusima spektra I ono naraste do  $\sim 6\text{ mm}$ . Nakon što se završi opterećivanje Spektrom I daljnje opterećivanje osnovnim opterećenjem ne uzrokuje daljnje naglo produljenje epruvete. Svi ispitni uzorci imali su veće produljenje kod opterećivanja Spektrom I, ali i znatno kraći životni vijek.

Kod opterećivanja Spektrom II, zbog velikih početnih amplituda u spektru koja ulaze u plastično područje materijala dolazi do značajnog produljenja epruvete na početku opterećivanja (slika 69). Kao što je vidljivo iz dijagrama nakon tog početnog produljenja ostali dio spektra ne utječe značajnije na produljenje epruvete sve do njezinog loma. Također se može primijetiti da nakon prvog ciklusa granica tečenja više nije izražena.

Iz svega navedenoga možemo s velikom sigurnošću ustvrditi da u području nisko cikličkog zamora osim same amplitude naprezanja značajnu ulogu na zamorni vijek materijala ima i vremenski redoslijed pojavljivanja pojedinih amplituda u spektru. Možemo zaključiti da je sa stajališta dinamičke izdržljivosti za brodski lim povoljniji spektar visoke - niske amplitude.

Smatramo da je razlog to što su početne visoke amplitude u spektru dovoljno očvrstnule materijal te da je to osnovni razlog dužeg trajanja Spektra II.



Slika 69. Početni ciklusi kod opterećivanja Spektrom II

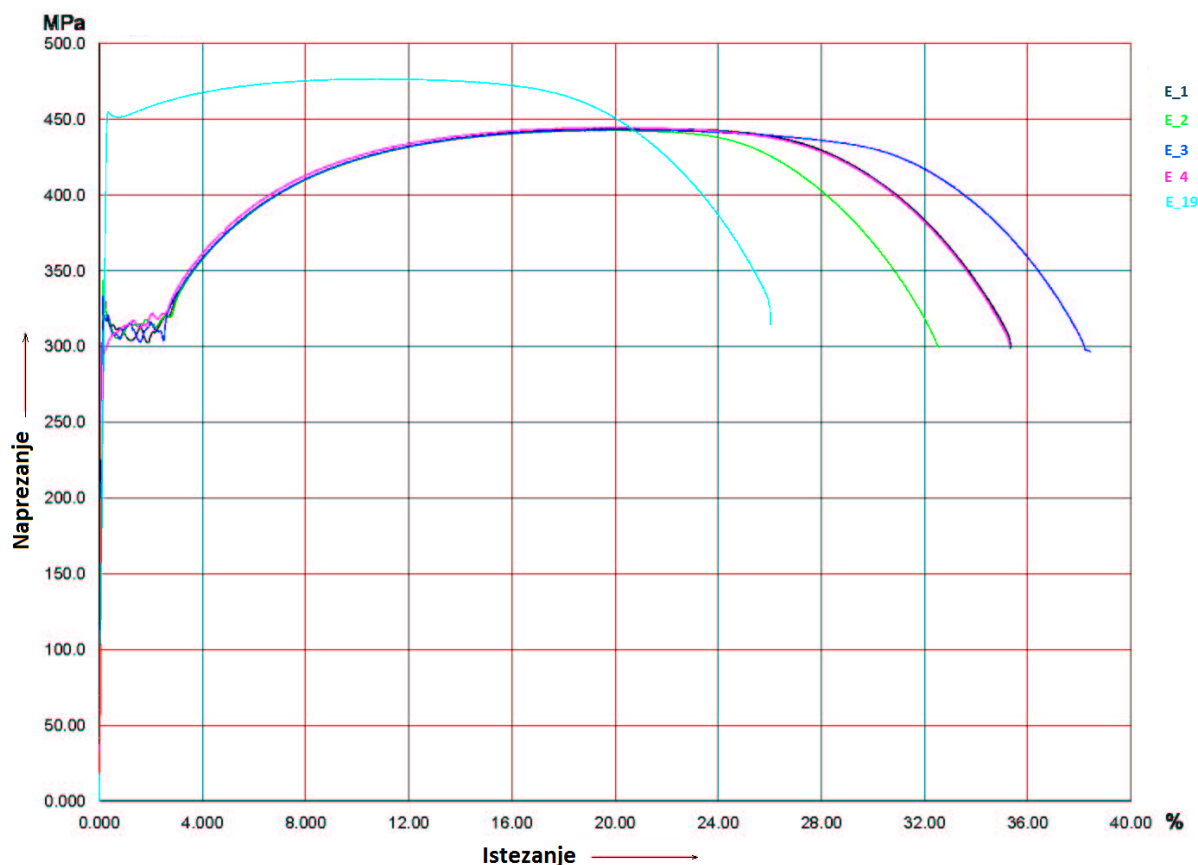
#### 7.4.1. Statički vlačni pokus u svrhu analize očvrstnuća materijala

U svrhu analize očvršćenja materijala napravljen je statički vlačni pokus na epruvetama koje su prethodno djelomično opterećene cikličkim opterećenjem prema tablici 20.

Tablica 20. Podaci opterećivanja karakterističnih epruveta

| Br. epruvete | Vrsta opterećenja | $\sigma_m$        | $\sigma_{max}$    | $\sigma_{min}$    | $\sigma_{maxo}$   | Broj ciklusa opterećivanja |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|
|              |                   | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> |                            |
| E_4          | Osnovno           | 143               | 260.00            | 26.00             | 260               | 1 617 744                  |
| E_19         | Spektar II        | 187               | 420.00            | -46.00            | 340               | 1040                       |

Na slici 64. Prikazani su rezultati statičkog vlačnog pokusa navedenih epruveta zajedno s rezultatima prethodnih ispitivanja. Na epruvetu E\_4 primijenjeno je opterećenje konstantne amplitude uz  $\sigma_{max} = 260 \text{ N/mm}^2$ , što znači da je epruveta tokom cijelog cikličkog ispitivanja bila u elastičnom području. Iako je epruveta ispitivana s velikim brojem ciklusa ( $N < 1\,600\,000$ ) nije došlo do očvršćenja materijala što je vidljivo iz dijagrama (slika 69.).



Slika 70. Naprežanje - istezanje

Tablica 21. Rezultati statičkog vlačnog pokusa

| Oznaka epruvete | $E$ [MPa] | $R_{eL}$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $\varepsilon_m$ [%] | $\varepsilon_u$ [%] |
|-----------------|-----------|-------------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|
| E_1             | 215,8     | 320,4                         | 444,0                      | 20,79               | 35,34               |
| E_2             | 206,7     | 320,0                         | 442,6                      | 19,92               | 32,57               |
| E_3             | 201,3     | 318,8                         | 443,1                      | 19,86               | 38,43               |
| E_4             | 200,4     | 314,9                         | 444,3                      | 20,49               | 35,30               |
| E_19            | 201,6     | 452,3                         | 476,6                      | 11,16               | 26,03               |

Na epruvetu E\_19 primijenjeno je prvih 6 blokova naprežanja (1040 ciklusa) Spektra II, u tom se području javljaju maksimalne amplitude unutar spektra. Iz dijagrama je vidljivo da

prilikom takvog opterećenja dolazi do značajnog očvršćenja materijala. Kao što je vidljivo iz tablice 21 vlačna čvrstoća i granica elastičnosti epruvete E\_19 se znatno povisuju u odnosu na prethodna mjerenja. Zbog tog očvršćenja koje se događa na početku Spektar II, ostatak spektra se odvija u elastičnom području pa su i epruvete koje smo opterećivali Spektrom II izdržale puno veći broj ciklusa.



## 8. ZAKLJUČAK

Pojava zamornog oštećenja materijala proučava se već dugi niz godina pa su i prva zapažanja popuštanja materijala uočena još sredinom devetnaestog stoljeća. Zamor materijala u brodskim konstrukcijama značajan je i dobro poznat problem brodogradnje i pomorstva. U posljednjih dvadesetak godina uslijed učestalih pomorskih nesreća (osobito tankera), moglo bi se reći da je zamor u centru pažnje mnogih znanstvenika diljem svijeta

Na temu dinamičke izdržljivosti materijala provode se mnoga teorijska i eksperimentalna istraživanja ali uglavnom u frekvencijskoj domeni. Neki autori smatraju da je zamorno oštećenje u jednom ciklusu neovisno o stanju materijala koje su uzrokovali prethodni ciklusi dok drugi smatraju da sa stajališta zamorne čvrstoće materijala različiti redoslijed vremenskog pojavljivanja blokova naprezanja utječe na dinamičku izdržljivost. Radovi koji pokrivaju takovo svojstvo materijal nisu mnogobrojni, a utjecaj vremenskog redoslijeda opterećenja na zamorno oštećenje materijala je tema ovog rada.

Da bi se ispitao utjecaj vremenskog redoslijeda pojavljivanja blokova naprezanja u spektru na dinamičku izdržljivost brodograđevinskog čelika prethodno je napravljen statički vlačni pokus. Na osnovu dobivenih rezultata generirani su spektri opterećenja kojima su amplitude dovoljno visoke da u prihvatljivom vremenskom razdoblju akumuliraju mjerljivo oštećenje.

Za provedbu dinamičkih ispitivanja kreirana su dva spektra opterećenja s varijabilnim amplitudama (Spektar I i Spektar II). U oba spektra su amplitude i brojevi ciklusa linearno proporcionalni amplitudama pojavljivanja morskih valova, kako bi se donekle realno simulirale stvarne amplitude naprezanja u materijalu. Amplitude u Spektaru I i Spektaru II imaju jednake iznose, međutim redoslijed njihovih pojavljivanja unutar spektra je inverzan. U Spektaru I amplitude naprezanja idu od minimalnih do maksimalnih vrijednosti, a u Spektaru II od maksimalnih do minimalnih, te se oba spektra nastavljaju osnovnom amplitudom do loma. Analizom rezultata ispitivanja ovakvim spektrom može se zaključiti koji spektar je akumulirao više zamornog oštećenja u materijalu.

Na temelju analize rezultata dinamičkih ispitivanja zaključeno je da na dinamičku izdržljivost materijala značajan utjecaj ima i vremenski redoslijed pojavljivanja amplituda u

spektru. Spektar II je trajao u prosijeku 30% više ciklusa od Spektara I, a uzrok tomu je što su početne visoke amplitude u spektru II očvrsnule materijal pa je gotovo cjelokupno daljnje opterećivanje bilo u elastičnom području.

Provedena ispitivanja bila su u području nisko cikličkog zamora (vremensko ograničenje trajanja eksperimenta) što znači da su maksimalne amplitude u spektru bile u plastičnom području. Daljnja ispitivanja treba bi se izvršiti u području visoko cikličkog zamora kako bi se utvrdilo ima li i u elastičnom području redosljed pojavljivanja blokova naprezanja utjecaj na zamornu čvrstoću materijala.

## **9. PRILOZI**

Programski kod za opterećivanje ispitnog uzorka priložen je na CD-u

## 10. LITERATURA

- [1] M. Franz: Mehanička svojstva materijala, Sveučilište u Zagrebu, 1998.
- [2] S. Tomašević: Dinamička izdržljivost brodskih konstrukcija, Magistarski rad
- [3] T. Brlić, M. Slišković: Najveće tankerske nezgode, Naše more 53(3-4)/2006
- [4] M. Husnjak: Mehanika loma, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2009.
- [5] B. Blagojević: Ocjenjivanje zamora brodskih konstrukcija, Magistarski rad, Zagreb, 2000
- [6] W. Schutz: A history of Fatigue, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 54 str 200 - 300, 1996.
- [7] K.G. Richards: Fatigue Strength of Welded Structures, The Welding Institute, Combridge, 5/1969.
- [8] K. Žiha: Konstrukcija broda 2, Fakultet strojarstva i brodogradnje, digitalni užbenik
- [9] J. Parunov: Dinamička izdržljivost brodskih konstrukcija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2008.
- [10] N. Krančević: Proračun spojeva konstrukcija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2008.
- [11] A. Almar - Naess: Fatigue Handbook, Tapin Publisher, Trondheim, 1985.
- [12] Hrvatski registar brodova: Pravila za tehnički nadzor pomorskih brodova, Dio 16 Dinamička izdržljivost
- [13] K. Žiha, V. Ivančević: Primjena procedure za analizu zamora brodskih konstrukcija
- [14] J. Schijve: Fatigue of Structures and Materials, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001.
- [15] D. Bjegović: Zaštita metala od korozije, Građevinski fakultet, Zagreb, 2009.
- [16] I. Juraga, I. Stojanović, T. Noršić: Zaštita broskog trupa od korozije i obraštanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [17] K. Žiha: Konstrukcija broda - Uvod, Fakultet strojarstva i brodogradnje, digitalni užbenik
- [18] B. Blagojević: Modeliranje strukturnih sustava broda događajima, Doktorski rad, Zagreb, 2005.
- [19] I. Buljan: Poznavanje broda i plovidbe, Školska knjiga, Zagreb, 1978.
- [20] D. Šumarec, D. Krajčinović: Osnovi mehanike loma, Naučna knjiga, Beograd, 1990.
- [21] D. Jelaska, Osnovi mehanike loma, 1. Dio.

- 
- [22] Ž. Domezet: Metode zaustavljanja širenja pukotine, Dizertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1993.
- [23] Y. L. Lee, J. Pan, R. Hathaway, M. Barkey: Fatigue Testing and Analysis
- [24] J. Krolo: Osnove mehanike loma, Građevinski fakultet, Zagreb, 2009.
- [25] P. Ljubičić: Mehanička svojstva brodograđevinskog čelika pri niskim temperaturama, Diplomski rad, Zagreb, 2010.
- [26] D. Jelaska: Elementi strojeva, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2006.
- [27] Norma DIN 50100
- [28] V. Grubišić: Pogonska čvrstoća, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2004.
- [29] J. Prpić-Orešić, V. Čorić: Pomorstvenost plovnih objekata, Zigo, Rijeka, 2006.
- [30] Global Wave Statistics, Unvin Brothers Limited, London, 1986
- [31] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [32] M. Franz, V. Ivušić: Materijali I, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 009.
- [33] Hrvatski registar brodova: Pravila za tehnički nadzor pomorskih brodova, Dio 25, Metalni materijali